DISSERTAÇÃO DE MESTRADO N°831

TESTES REAIS DE RECOMPOSIÇÃO - PROPOSTA APLICADA A PROJETOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS DE AUTORRESTABELECIMENTO

Jenaína Aparecida de Souza

DATA DA DEFESA: 18/06/2014

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

TESTES REAIS DE RECOMPOSIÇÃO - PROPOSTA APLICADA A PROJETOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS DE AUTORRESTABELECIMENTO

Jenaína Aparecida de Souza

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Maria Helena Murta Vale

Belo Horizonte - MG

Junho de 2014

"Testes Reais de Recomposição - Proposta Aplicada a Projetos de Usinas Hidrelétricas de Autorrestabelecimento"

Jenaína Aparecida de Souza

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 18 de junho de 2014.

Por:

Maria Helena Murta Vale

Prof. Drª. Maria Helena Murta Vale
DEE (UFMG) - Orientadora

Dr. Cláudio Homero Ferreira Silva
TE/AE (CEMIG)

Rosilene Nietzsch Dias

Dra. Rosilene Nietzsch Dias
LRC (UFMG)

"Testes Reais de Recomposição – Proposta Aplicada a Projetos de Usinas Hidrelétricas de Autorrestabelecimento"

Jenaína Aparecida de Souza

Dissertação de Mestrado apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais em 18 de junho de 2014.

Convidado Especial:

Heber Assis Garcias

Eng. Heber Assis Garcias
(PO/GT - CEMIG)

Dedico esta dissertação ao meu amado Jesus e aos seguintes: Francisco, Dirce, Geraldo, Geísa e Fabiano, as pessoas mais importantes na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus que enviou Jesus com o propósito de dar a vida eterna a todo aquele que Nele crer. A esse Deus que me chama de amiga se importando e insistindo em me surpreender com o seu amor constrangedor. De forma graciosa sempre me revelando que os seus planos e projetos são maiores e melhores que os meus. Pois é Ele quem tem o poder para *dobrar* o coração de quem Ele quiser simplesmente para me abençoar.

Aos meus pais por terem acreditado mesmo quando não havia no que crer, pois todas as circunstâncias diziam *não*, mas eles, com humildade e sabedoria, escolheram dizer *sim*.

Ao meu pãozinho de mel Fabiano, pelo ombro aconchegante, pela compreensão, paciência e apoio durante este período.

Ao meu irmão Geraldo pela paciência e habilidades com internet e AUTOCAD.

À professora Maria Helena, que tem se manifestado muito mais do que uma professora. Tem sido um verdadeiro presente de Deus para mim desde o CESEP e durante a orientação neste.

À Cemig, representada nos meus coordenadores, em especial Luiz Eugênio, Henrique Siqueira e Heber Assis, pelas oportunidades de participação em congressos e seminários, envolvimento em atividades relacionadas a testes de recomposição e oportunidade de cursar o CESEP e o mestrado.

Agradeço a vocês por terem me apoiado.

Muito obrigada.

“Olho nenhum viu, ouvido nenhum ouviu, mente nenhuma imaginou o que Deus preparou para aqueles que o amam”

Manual do Fabricante 1 Coríntios 2:9

RESUMO

Esta dissertação aborda o tema *Testes Reais de Recomposição em Usinas Hidrelétricas*. O trabalho propõe um novo procedimento, sob a forma de diretrizes, aplicado à etapa de projeto de usinas. Tais diretrizes visam preparar a usina, já na fase de projeto, para uma futura necessidade de realização dos testes, durante a fase de operação. Para consolidar toda a estratégia de execução dos testes, é proposta a ferramenta computacional SIAPE – *Simulador Automático de Perturbação*.

ABSTRACT

This thesis addresses the Real Tests for Hydroelectric Plants Restoring Process. The work proposes a new innovative proceeding, by the use of guidelines, applied to hydroelectric project area. The proceeding aims the elaboration of adequate plants project in order to prepare them for future test conditions required during real time operation. It is proposed a computational tool, called SIAPE – Disturbance Automatic Simulator, in order to consolidate the entire strategy.

ÍNDICE

LISTA DE SIGLAS - INSTITUIÇÕES

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CCEE: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CEPEL: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CESEP: Curso de Especialização em Sistema Elétrico de Potência

CNPE: Conselho Nacional de Política de Energia

CMSE: Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico

CNOS: Centro Nacional de Operação do Sistema

COSR: Centro de Operação dos Sistemas Regionais

COSR-NCO: Centro de Operação Regional Norte / Centro Oeste

COSR-NE: Centro de Operação Regional Nordeste

COSR-S: Centro de Operação Regional Sul

COSR-SE: Centro de Operação Regional Sudeste

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

MME: Ministério de Minas e Energia

ONS: Operador Nacional do Sistema

SIN: Sistema Interligado Nacional

LISTA DE ABREVIATURAS - TERMOS TÉCNICOS

CA: Corrente Alternada

CAG: Controle Automático de Geração

CAT: Controle Automático de Tensão

CB: Carregador de Baterias

CC: Corrente Contínua

CCA: Barramento de Corrente Contínua do Lado A

CCB: Barramento de Corrente Contínua do Lado B

CF: Casa de Força

CM: Centro de Motores

ECS: Esquema de Controle de Segurança

ERAC: Esquema Regional de Alívio de Carga

GA: Barramento de Corrente Alternada do Lado A

GB: Barramento de Corrente Alternada do Lado B

GMG: Grupo Motor Gerador a Diesel de Emergência

LD: Linha de Distribuição

ONAN: Óleo Normal Ar Normal

ONAF: Óleo Normal Ar Forçado

SEP: Sistema Especial de Proteção

SIAPE: Simulador Automático de Perturbação

SPCI: Sistema de Proteção Contra Incêndio

TP: Transformador de Potencial

UG: Unidade Geradora

UH: Usina Hidrelétrica

VT: Vertedouro

LISTA DE ABREVIATURAS – DOCUMENTOS E OUTROS

CPSA: Contrato de Prestação de Serviço Ancilar

EIA: Estudo de Impacto Ambiental

ESS: Encargos de Serviços do Sistema

IO: Instrução de Operação

LI: Licença de Instalação

LO: Licença de Operação

LP: Licença Prévia

NCO: Subsistema Norte-Centro Oeste

NE: Subsistema Nordeste

PLD: Preço de Liquidação de Diferenças

RIMA: Relatório de Impacto Ambiental

RO-RR.BR.01: Rotina Operacional para Testes Reais de Recomposição na Rede de Operação

S: Subsistema Sul

SE: Subsistema Sudeste

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda o tema *Recomposição de Sistemas Elétricos de Potência,* em especial os aspectos relacionados à capacidade de autorrestabelecimento das UHs (Usinas Hidrelétricas). Apesar dos procedimentos de restabelecimento já fazerem parte das atividades de Expansão e de Operação dos sistemas elétricos, questões importantes ainda precisam ser tratadas, para que as ações de controle restaurativo sejam realizadas de forma adequada.

De uma forma geral, pode-se caracterizar o processo de recomposição dos sistemas elétricos como sendo um passo a passo que, tem seu início e vai progredindo, tornando o sistema cada vez mais robusto e mais seguro com a interligação de UGs (Unidades Geradoras) e consequente tomada de carga. Desta forma, o sistema vai se tornando menos vulnerável às oscilações de tensão e frequência com toda a carga sendo atendida. Uma referência interessante que trata do tema controle restaurativo é o trabalho [LOPES, 2002].

O controle restaurativo do SIN (Sistema Interligado Nacional) é executado considerando duas fases: a fluente e a coordenada.

> *A fase fluente corresponde à "primeira fase da recomposição do sistema interligado, na qual os procedimentos operacionais, previamente estabelecidos, permitem a recomposição de áreas de autorrestabelecimento, de forma descentralizada, com o mínimo de comunicação das usinas e subestações com os centros de operação"* [ONS, 2012].
>
> *A fase coordenada corresponde à "segunda fase da recomposição do sistema interligado na qual são efetuados, com a coordenação dos centros de operação, o fechamento de paralelos e anéis entre áreas e regiões, a liberação de restabelecimento de carga adicional e a intervenção na recomposição* fluente, quando de impedimento no processo preferencial" [ONS, 2012].

Na operação em tempo real, o restabelecimento do sistema interligado é realizado por meio das chamadas IOs (Instruções de Operação), as quais são elaboradas na etapa de estudos.

Em 2009, no SIN, houve forte perturbação de proporções sistêmicas [ONS,2009]. Neste evento os órgãos operador (ONS – Operador Nacional do

Sistema) e fiscalizador (ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica) verificaram que muitas usinas não foram capazes de proceder a um autorrestabelecimento satisfatoriamente, fato que comprometeu o processo de recomposição do sistema interligado.

A partir de então, para evitar que tal fato se repetisse, o ONS passou a se utilizar da rotina operacional para *Testes Reais de Recomposição*, denominada RO-RR.BR.01 [ONS, 2014].

Estes testes exigem que os agentes de geração simulem condições de perturbação que não são triviais. É importante observar que a complexidade, neste caso, não se refere à recomposição após uma situação de desligamento real e, sim, à simulação desta condição, mantendo o sistema em operação normal.

Tema central deste trabalho, as usinas de autorrestabelecimento são aquelas classificadas, por meio de estudos elétricos e energéticos, para participarem do processo de recomposição durante uma perturbação real.

Atualmente, os testes reais de recomposição são divididos em *Parcial Individual-Simultâneo* e *Integral Individual-Simultâneo*. Esta classificação se deve à forma como a usina participa das ilhas de restabelecimento durante uma recomposição nas fases fluente ou coordenada.

> *"Usinas de autorrestabelecimento integral são usinas que possuem capacidade de autorrestabelecimento quando todas as suas unidades geradoras estão na condição de repouso (desligadas elétrica e mecanicamente) independente de utilizar qualquer alimentação externa para suprir os seus serviços auxiliares."* [ONS, 2014]

> *"Usinas de autorrestabelecimento parcial são usinas que possuem uma ou mais unidades geradoras com capacidade de alimentar seus serviços auxiliares a partir da tensão terminal de seus próprios geradores. Pelo menos uma das unidades geradoras, após a ocorrência de uma perturbação ou distúrbio no sistema elétrico, deve permanecer girando mecanicamente e excitada. Para esse entendimento, não se considera a condição de parada das unidades geradoras por atuação de proteção própria."* [ONS, 2014]

Desta forma, os testes reais de recomposição constituem uma ação prévia para verificação da plena disponibilidade de sistemas e equipamentos que poderão participar satisfatoriamente de um processo de recomposição.

A recomposição, durante uma perturbação real do SIN, conforme já mencionado, é regulamentada pelas IOs que são resultado dos estudos do ONS (Operador Nacional do Sistema), cuja responsabilidade de elaboração é do próprio ONS, com a participação dos agentes.

O agente de geração tem autonomia para proceder à preparação dos disjuntores de suas estações e posteriormente restabelecer o número mínimo de unidades geradoras (usinas de autorrestabelecimento integral) e a respectiva tomada de carga. Esta é a chamada fase fluente.

Na fase secundária, fase coordenada, o ONS é informado a respeito da conclusão das manobras relativas à fase fluente e passa a coordenar as próximas manobras de fechamento do paralelo entre ilhas de restabelecimento e interligação de outras unidades geradoras (usinas de autorrestabelecimento parcial).

Visto que as usinas foram projetadas e construídas sem considerar a necessidade de realização destes testes, é necessário que os agentes façam adaptações e melhorias e proponham estratégias para sua realização. Entretanto, nem sempre as usinas respondem satisfatoriamente, levando à reprovação do teste ou à sua não execução. As dificuldades das simulações levam a esta situação, como exposto em [VERBOONEN, 2012].

Algumas estratégias aplicadas na prática de execução dos testes podem ser verificadas nos trabalhos [SOUZA, 2012], [SOUZA, 2012a], [SOUZA, 2012b] e [SOUZA, 2013]. Nestes registros, fica clara a complexidade da questão.

Do exposto, destacam-se a complexidade do controle restaurativo, a importância do funcionamento adequado das usinas de autorrestabelecimento neste processo e a dificuldade de se realizarem os testes reais de recomposição das mesmas, principalmente das instalações mais antigas, surgiu a principal motivação para o desenvolvimento desta pesquisa de mestrado no tema: *investigar detalhadamente o processo envolvido nos testes, identificar seus pontos críticos e propor procedimentos visando trazer avanços para o restabelecimento do sistema.*

A experiência prática na operação de usinas hidrelétricas na condução de testes reais de recomposição, registrada nas referências acima citadas, e o conhecimento adquirido durante a realização do CESEP (Curso de Especialização em Sistemas Elétricos de Potência) [SOUZA, 2012b], conduziram os estudos a uma nova visão do processo. Verificou-se que vários problemas enfrentados na prática poderiam ser evitados se, na fase de projeto da usina, já se considerasse a possibilidade desta participar dos testes de recomposição.

De forma mais especifica, dentre as dificuldades observadas na prática, conforme detalhado em [SOUZA, 2012], alguns aspectos se destacam, justificando o foco do trabalho:

- Subjetividade ou falta de diretrizes para elaboração de projetos que levem em consideração a necessidade de realização de testes de recomposição;

- Obrigatoriedade quanto à realização destes testes em usinas de autorrestabelecimento;
- Dinamicidade na classificação das usinas de autorrestabelecimento.

Um aspecto adicional que merece ser observado é o fato de que projetos de usinas hidrelétricas têm passado por inovações ao longo dos anos em função das necessidades de adaptação às exigências do setor elétrico. Dentre elas citam-se aquelas relacionadas ao circuito de alívio de carga do serviço auxiliar e ao circuito de exercício do GMG (Grupo Motor Gerador a Diesel de Emergência). Tais inovações possibilitaram a automatização de processos rotineiros da operação.

Considerando o exposto acima, pode-se caracterizar o **objetivo** desta dissertação: *propor diretrizes às áreas de projeto de usinas hidrelétricas, com vistas à necessidade dos testes reais de recomposição, e especificar uma ferramenta que possa automatizar a realização destes; esta ferramenta é denominada **SIAPE** - Simulador Automático de Perturbação.*

Desta forma, esta dissertação atua como um *feedback* da operação à área de projeto de usinas hidrelétricas, quanto aos quesitos requeridos pelos testes reais de recomposição. Pretende-se, com este trabalho, que, a partir das diretrizes propostas, as usina construídas nesses moldes sejam capazes de simular as condições de perturbação total ou parcial de maneira facilitada, da mesma forma como ocorre com outros processos já automatizados em usinas hidrelétricas, tais como partida e parada de unidades geradoras.

Uma contribuição adicional pretendida é tornar o texto um documento de referência básica para aqueles que se iniciam no tema, incluindo conceitos e conhecimentos relevantes para uma melhor compreensão dos testes.

Devido à importância da eficiência de ações de recomposição para a operação dos sistemas elétricos, a proposta trará benefícios diretos para as empresas, consumidores e toda a sociedade.

Para cumprir seu objetivo, o texto do trabalho está distribuído em sete capítulos, incluindo a presente Introdução. Inicialmente estão listadas as siglas das instituições, dos termos técnicos e dos documentos citados no trabalho.

No Capítulo 2 são apresentados conceitos gerais a respeito do Sistema Interligado Nacional, bem como as instituições que o compõem. Ainda é tratada a legislação que regimenta a questão dos serviços ancilares.

No Capítulo 3 são identificados os mais relevantes equipamentos e sistemas constituintes de uma usina hidrelétrica. Neste capítulo, não se pretende esgotar o assunto e, sim, abordar de forma sucinta os diversos sistemas envolvidos que podem afetar direta ou indiretamente um teste de recomposição ou uma recomposição real.

No Capítulo 4 a rotina para testes reais de recomposição é analisada.

O Capítulo 5 traz uma síntese das diretrizes atualmente vigentes para projetos de usinas hidrelétricas, com base em documentos do CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), ANEEL, ONS e ELETROBRAS.

No Capítulo 6 são propostas adequações às usinas hidrelétricas ainda na fase de projeto e a automatização dos testes de recomposição através do SIAPE.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e as propostas de continuidade da pesquisa de mestrado.

Ao final do texto, são listadas as Referências Bibliográficas utilizadas. O documento ainda inclui o Apêndice A denominado *Critérios para Projetos Eletromecânicos*.

2 O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

2.1 Considerações Iniciais

O governo federal, em 2003, formulou as bases de um novo modelo para organização do setor elétrico brasileiro, tendo como meta alcançar objetivos, tais como: modicidade tarifária; segurança do suprimento de energia elétrica; universalização do acesso e uso da energia elétrica. Com esse propósito o governo instituiu alguns órgãos e reformulou a atribuição de outros já existentes [CCEE, 2012], [CEPEL, 2007].

Este capítulo apresenta o modelo atualmente adotado para o SIN destacando os órgãos a ele relacionados. O entendimento da articulação entre eles permite a identificação daqueles que, direta ou indiretamente, possam influenciar a realização nos testes reais de recomposição.

Neste capítulo também são revistos alguns conceitos e a legislação a respeito dos serviços ancilares, visto que a realização dos testes configura-se como um serviço ancilar.

2.2 Modelo do Setor Elétrico Brasileiro

Neste item são identificados os órgãos componentes do SIN, bem como suas atribuições. Adicionalmente são indicadas as redes existentes, a definição de cada uma e a hierarquia a que estão submetidas.

2.2.1 Instituições do Setor Elétrico

Atualmente, o setor elétrico é composto por várias instituições que possuem atribuições especificas, com a finalidade de assegurar a manutenção e os objetivos que deram origem à sua reformulação.

A figura 2.1, adaptada de [CCEE, 2012], identifica tais instituições e mostra a hierarquia existente entre elas.

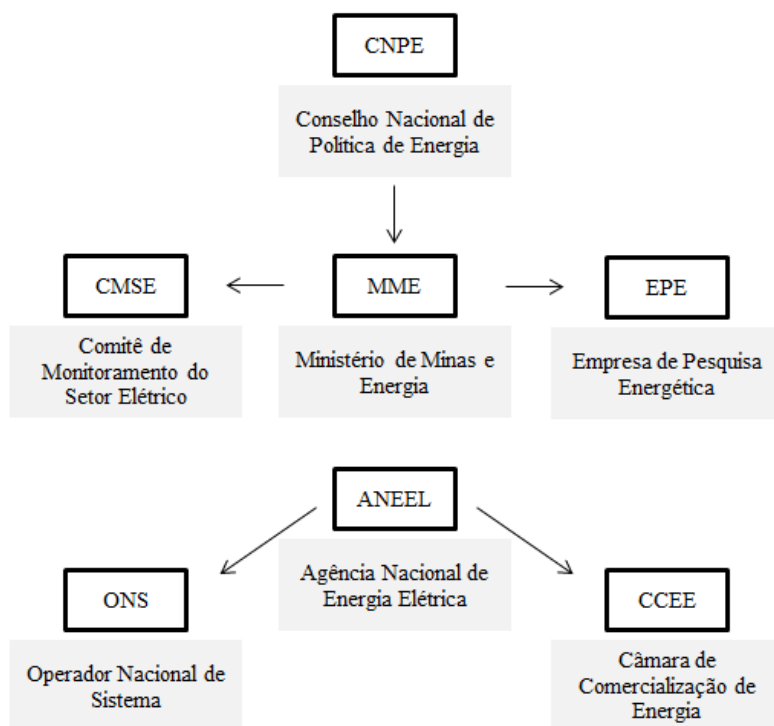



Figura 2.1 - Instituições do setor elétrico brasileiro.
Fonte: Adaptado de [CCEE, 2012]

CNPE - Conselho Nacional de Política Energética:

"Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), criado pela Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, tem a atribuição de propor ao Presidente da República políticas nacionais e medidas específicas relacionadas à energia. São seus integrantes: o Ministro de Estado de Minas e Energia, que o preside; o Ministro de Estado da Ciência e Tecnologia; o Ministro de Estado do Planejamento, Orçamento e Gestão; o Ministro de Estado da Fazenda; o Ministro de Estado do Meio Ambiente; o Ministro de Estado do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior; o Ministro Chefe da Casa Civil da Presidência da República; um representante dos Estados e do Distrito Federal; um cidadão brasileiro especialista em matéria de energia; e um representante de universidade brasileira, especialista em matéria de energia." [CNPE, 2013]

MME - Ministério de Minas e Energia:

"Ministério de Minas e Energia (MME), criado pela Lei nº 3.782, de 22 de julho de 1960, extinto em 1990, pela Lei nº 8.028 e recriado em 1992, por meio da Lei nº 8.422. Tem como área de competência os seguintes assuntos: I – geologia, recursos minerais e energéticos; II – aproveitamento da energia hidráulica; III– mineração e metalurgia; e IV – petróleo, combustível e energia elétrica, inclusive nuclear. Cabe ainda ao MME: I – energização rural, agroenergia, inclusive eletrificação rural, quando custeadas com recursos vinculados ao Sistema Elétrico Nacional; e II – zelar pelo equilíbrio conjuntural e estrutural entre a oferta e a demanda de energia elétrica no País." [MME, 2013]

EPE - Empresa de Pesquisa Energética:

“Empresa de Pesquisa Energética (EPE), entidade vinculada ao Ministério de Minas e Energia com finalidade de prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, nas áreas de energia elétrica, combustíveis fósseis, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, criada pela Lei nº 10.847 de 15 de março de 2004.” [EPE, 2013]

CMSE - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico:

“Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), criado pela Lei nº 10.848 de 2004 e constituído pelo Decreto nº 5.175 de 2004, com a função de acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletroenergético em todo o território nacional. É presidido pelo Ministro de Estado de Minas e Energia e composto por quatro representantes do Ministério de Minas e Energia e pelos titulares da ANEEL, ANP, CCEE, EPE e ONS.” [CMSE, 2013]

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

“Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), autarquia em regime especial, vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), criada pela Lei nº 9.427 de 26 de dezembro de 1996. É o órgão regulador do Setor Elétrico encarregado de, entre outras atribuições, (i) regulamentar e fiscalizar o serviço concedido e fiscalizar permanentemente a sua prestação; (ii) mediar os conflitos de interesses entre os agentes do setor elétrico e entre estes e os consumidores; (iii) implementar as políticas e diretrizes do governo federal para a exploração da energia elétrica e o aproveitamento dos potenciais hidráulicos; e (iv) promover as licitações destinadas à contratação de concessionárias de serviço público para produção, transmissão e distribuição de energia elétrica e para a outorga de concessão para aproveitamento de potenciais hidráulicos.” [ANEEL, 2013]

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

“Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), criada pela Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, para suceder ao Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE). Pessoa jurídica de direito privado sem fins lucrativos e sob regulação e fiscalização da ANEEL, tem por finalidade viabilizar a comercialização de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN). A CCEE tem por atribuição, entre outras, de promover leilões de compra e venda de energia elétrica, desde que delegado pela ANEEL, manter o registro de todos os Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado, manter o registro dos montantes de potência e energia objeto de contratos celebrados no Ambiente de Contratação Livre, promover a medição e o registro de dados relativos às operações de compra e venda de energia elétrica, apurar o Preço de Liquidação de Diferenças (PLD) do mercado de curto prazo por submercado.” [CEPEL, 2007]

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

Tem a responsabilidade de operar, supervisionar e controlar a geração de energia elétrica no SIN e administrar a rede básica de transmissão de energia elétrica no Brasil atendendo aos requisitos de carga, otimizando custos e garantindo a confiabilidade do sistema e definindo as condições de acesso à malha de transmissão em alta tensão do país. [ONS, 2013]

Adicionalmente, no contexto do setor elétrico nacional, encontra-se o:

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

"Criado em 1974 para a formação de uma infraestrutura científica e de pesquisa, visando o desenvolvimento, no país, de uma tecnologia avançada no campo de equipamentos e sistemas elétricos. Seu principal mantenedor é a Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás) e suas controladas. Os beneficiários de seus produtos transcendem ao Grupo Eletrobrás, atingindo instituições como o MME, MMA, MCT, a EPE, ONS, a CCEE, a Aneel, além de concessionárias e fabricantes de equipamentos." [CEPEL, 2007]

2.2.2 Os Órgãos do Setor e os Testes Reais de Recomposição

A realização dos testes de recomposição é de responsabilidade do agente de geração se a usina de propriedade deste for classificada para tal. Nesse contexto é relevante identificar as atribuições do ONS e da ANEEL e, consequentemente, dos agentes durante o processo de operação normal e durante a realização do teste.

De forma geral, a ANEEL atua fiscalizando a realização dos testes, bem como aplicando as penalidades cabíveis. O ONS atualmente é o elaborador e revisor das instruções que regem o assunto e acompanha a realização dos testes *in loco*.

No âmbito da operação, o ONS é o gestor do processo, cabendo a este indicar a reclassificação das usinas, quanto ao teste a ser realizado, e sua substituição em caso de reprovação. Adicionalmente cabe ao ONS realizar análises elétricas e energéticas para que o SIN esteja em condição normal e segura durante o teste.

Com o objetivo de situar as usinas de autorrestebelecimento nas redes do SIN, faz-se necessário identifica-las e classificá-las. Este assunto é tratado no item seguinte.

2.2.3 Redes do Sistema Interligado Nacional

Como o Brasil é um país de dimensões continentais, verifica-se a necessidade de se decompor o SIN em sub-redes, a fim de se definirem as responsabilidades nas ações operativas dos centros de operação do ONS e dos agentes. Tais redes são assim identificadas [ONS, 2012]:

Rede básica: rede definida e regulamentada pela ANEEL.

Rede complementar: rede que está fora da rede básica cujos fenômenos influenciam na rede básica.

Rede de operação: junção das redes básica e complementar, incluídas as usinas despachadas centralizadamente.

Rede de supervisão: formada pela rede de operação e outras instalações que são monitoradas através do sistema de supervisão, para que o ONS possa coordenar o SIN.

Rede de simulação: formada pela rede de supervisão e outras instalações que devem ser representadas em programas de simulação, para maior confiabilidade dos estudos elétricos desenvolvidos pelo ONS.

A figura 2.2 adaptada de [ONS, 2012a] representa esquematicamente a composição do Sistema Interligado Nacional.

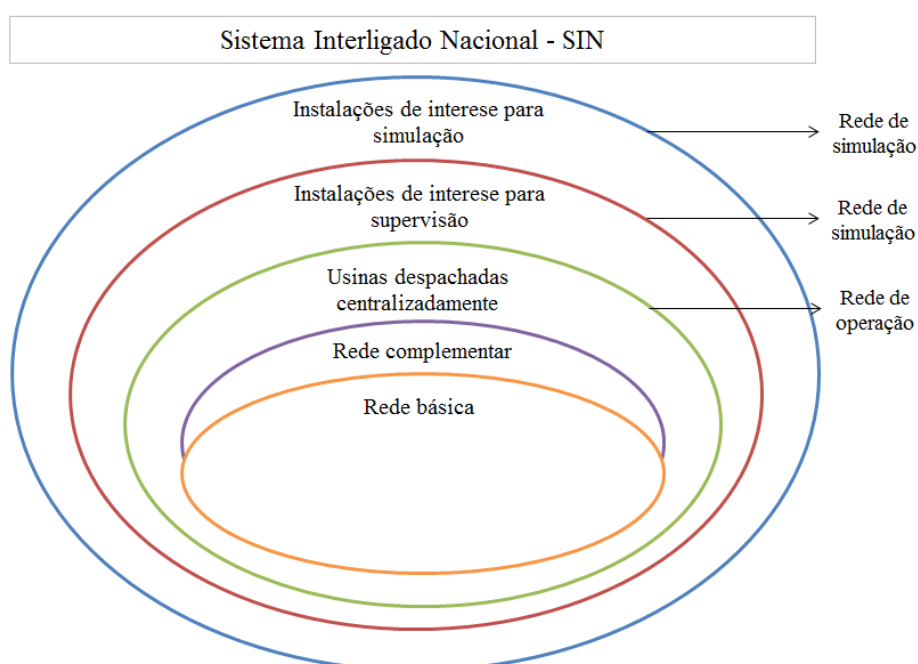



Figura 2.2 - Composição do Sistema Interligado Nacional.
Fonte: Adaptado de [ONS, 2012a]

É importante salientar que a classificação das usinas de autorrestabelecimento está mais relacionada com sua posição estratégica do que com sua potência instalada. De forma geral, estas usinas são despachadas centralizadamente e podem ou não estar ligadas na rede básica.

Nesse contexto, é possível observar no SIN usinas com pequena potência, muitas vezes nem ligadas na rede básica, classificadas para realização de testes. Por outro lado, usinas com grande potência não são indicadas para a realização de testes. Desta forma, verifica-se que a seleção da usina não possui relação com seu porte e sim, à sua posição estratégica na região de interesse para a recomposição.

2.2.4 Os Testes Reais de Recomposição e a Operação do SIN

Tendo em vista a responsabilidade do ONS de coordenação, controle e supervisão da operação das instalações de transmissão com tensão igual ou superior a 230kV e das usinas despachadas centralizadamente, cabe uma abordagem mais detalhada a respeito deste órgão.

Para que seja capaz de executar suas responsabilidades quanto ao SIN, o ONS possui cinco centros próprios de operação. São eles:

CNOS – Centro Nacional de Operação do Sistema

Centro de mais alto nível hierárquico, atuando sobre os demais centros do ONS. Possui como funções:

- Coordenar, supervisionar e controlar a rede de operação e as interligações internacionais;
- Despachar a geração das usinas operadas centralizadamente;
- Comandar e executar o despacho das usinas sob CAG (Controle Automático de Geração);
- Comandar e executar os CAT (Controle Automático de Tensão) e os ECS (Esquema de Controle de Segurança).

COSR – Centros Regionais de Operação do Sistema

Há quatro centros regionais de propriedade do ONS assim identificados:

COSR-S - Centro de Operação Regional Sul;
COSR-NCO - Centro de Operação Regional Norte / Centro-Oeste;
COSR-NE - Centro de Operação Regional Nordeste;
COSR-SE - Centro de Operação Regional Sudeste.

Os centros regionais são responsáveis por:

- Coordenar, supervisionar e controlar a rede de operação regional/local;
- Supervisionar e controlar o despacho de geração das usinas despachadas centralizadamente e da rede de operação sistêmica;
- Comandar e executar o despacho das usinas sob CAG, CAT e ECS, nas instalações de sua área de atuação, definidas pelo ONS.

Os agentes de geração, de transmissão e de distribuição têm a responsabilidade de comandar, executar e supervisionar as instalações de geração, transmissão e distribuição, respectivamente.

Quanto às instalações que não pertencem à rede de operação, o centro de operação do agente é responsável por ações de coordenação, supervisão, controle, comando e execução da operação. A figura 2.3 esquematiza as responsabilidades dos agentes.

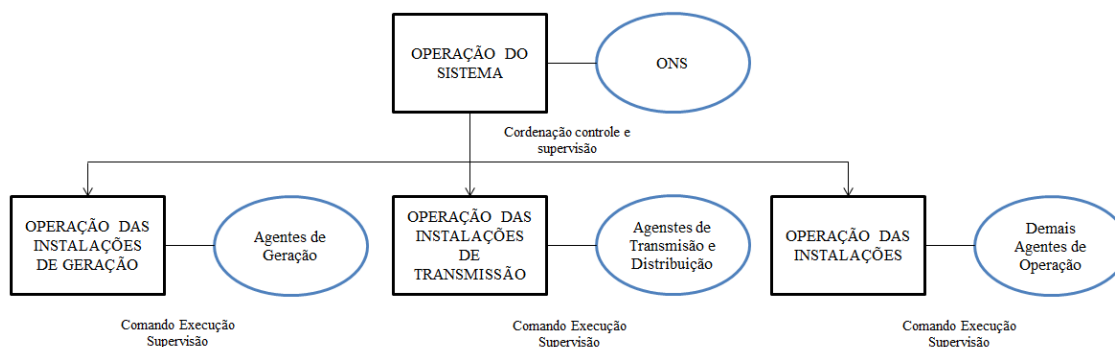



Figura 2.3 - Responsabilidades dos agentes de geração, transmissão, distribuição e ONS.

No contexto desta dissertação, é importante ressaltar, mais uma vez, que é de responsabilidade dos agentes de geração a execução dos testes reais de recomposição nas usinas classificadas para tal. O ONS deve acompanhar e gerir a execução de tais testes [ONS, 2012a].

Conforme já introduzido no Capítulo 1, os testes têm a finalidade de verificar se as usinas classificadas para tal têm condições de proceder a uma recomposição em caso de perturbação real. Os agentes devem encontrar estratégias para simular as condições de perturbação observando as limitações da usina, e o ONS (área de estudos elétricos e energéticos) zela pela continuidade do fornecimento de energia. Apesar da importância dessas estratégias, é essencial a execução dos testes, para manter a confiabilidade da recomposição, bem como a operação saudável dos equipamentos.

Cabe ressaltar que o serviço *Black Start* (para usinas de autorrestabelecimento) é um serviço ancilar pelo qual o agente é remunerado e firma contrato com o ONS. Diante disto, o assunto serviço ancilar é abordado no item seguinte.

2.3 Serviços Ancilares - Conceituação

Em um sistema de energia de grande extensão, envolvendo várias empresas desverticalizadas (geração, transmissão e distribuição), é necessário contar com serviços suplementares que assegurem o funcionamento mais adequado da rede elétrica. Esses serviços, denominados serviços ancilares, são exigidos para garantir a continuidade e a qualidade de suprimento de energia satisfatoriamente, tanto com relação aos níveis de tensão como nos de frequência. De forma geral, tais recursos têm a finalidade de contribuírem para a garantia da operacionalidade do SIN e, normalmente, compreendem:

- Controles primário e secundário de frequência e suas reservas de potência;
- Reserva de prontidão;

- Suporte de reativo;
- Sistema Especial de Proteção - SEP;
- Autorrestabelecimento das unidades geradoras (*Black Start*).

Observa-se que é de responsabilidade do ONS contratar e administrar os serviços ancilares necessários à operação do SIN. São estabelecidos os critérios relativos aos arranjos comerciais para tais serviços prestados pelos agentes, para a celebração e administração dos CPSA (Contrato de Prestação de Serviços Ancilares) e para a apuração mensal referente a estes.

No contexto desta dissertação, cabe conceituar o assunto, pois as usinas de autorrestabelecimento integral executam o serviço ancilar denominado Autorrestabelecimento das Unidades Geradoras (*Black Start)*. Conforme legislação vigente, este serviço deve ser prestado pelas usinas que possuem equipamentos para esse fim e sempre que solicitado pelo ONS.

As usinas em fase de operação que venham a prestar o serviço de *Black Start*, por determinação do órgão operador, ou que necessitem repor os sistemas ou equipamentos existentes, têm o custo auditado e aprovado pela ANEEL e ressarcido por meio de ESS (Encargos de Serviços do Sistema). As usinas que prestam este serviço celebram um CPSA com o ONS [ONS, 2009a]. O custo de operação e manutenção dos equipamentos de autorrestabelecimento, auditado e aprovado pela ANEEL, é ressarcido também via ESS.

Para usinas ainda na fase de projeto, a ANEEL pode determinar que esta futuramente seja prestadora deste serviço ancilar e, da mesma forma, devem celebrar CPSA.

2.4 Considerações Finais

Com os conceitos apresentados neste capítulo, pode-se verificar que a estrutura, hierarquia, organização e legislação que norteiam o SIN têm o propósito de alcançar os objetivos previamente estabelecidos durante a reformulação do modelo do setor elétrico. Dentre estes objetivos, encontra-se a segurança do suprimento de energia. Nesse contexto, estão os testes reais de recomposição, que, especificamente para as usinas de autorrestabelecimento integral, constituem um serviço ancilar.

A realização dos testes reais de recomposição exige que algumas condições de perturbação parcial ou total sejam simuladas. Como pode ser verificado, em função de estudos elétricos e energéticos, as usinas podem ser reclassificadas de acordo com a necessidade do sistema, demandando dos agentes de geração transmissão e distribuição estratégias para alcançar tal objetivo.

Algumas usinas do SIN não têm sido capazes de simular as condições de perturbação, demandando alteração de sua classificação ou desconforto entre os órgãos operador e fiscalizador e o agente de geração.

A necessidade das estratégias motivou a realização desta dissertação cujo principal objetivo é propor, às áreas de projeto de usinas hidrelétricas, adequação de circuitos e sistemas de forma a proporcionar a realização dos testes. Contemplando a dinamicidade que o assunto requer, o trabalho evoluiu para a proposta de automatizar os testes, por meio de uma ferramenta, o SIAPE.

Antes de tratar especificamente das propostas aplicadas às usinas de autorrestabelecimento, no próximo capítulo são apresentados conceitos básicos a respeito das usinas hidrelétricas. Neste, pode-se verificar os equipamentos que impactam direta ou indiretamente no restabelecimento de uma unidade geradora.

3 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE O FUNCIONAMENTO DE USINAS HIDRELÉTRICAS

3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta uma visão geral dos diversos componentes de uma usina hidrelétrica. O entendimento deste assunto é importante no sentido de facilitar a compreensão dos requisitos e da metodologia adotados na realização dos testes de recomposição.

Comparadas àquelas das linhas de transmissão e dos transformadores, as condições impostas às unidades geradoras podem ser consideradas mais complexas. Sob este aspecto, destacam-se duas características. A primeira refere-se à quantidade e a forma com a qual se interagem os vários periféricos de uma UG. A segunda diz respeito à relação direta que a usina possui com o ambiente que as rodeia, tal como as populações ribeirinhas, irrigação, ictiofauna local, dentre outros. Isto traz complexidade aos testes.

Os conceitos apresentados neste capítulo têm como base os trabalhos [CEMIG, 2006] e [CUNHA, 2006]. Inicialmente, são apresentados os principais componentes das usinas e, posteriormente, são detalhados os sistemas e circuitos que impactam de forma mais decisiva a execução dos testes reais de recomposição. Sequência para conexão e desconexão de unidade geradora ao sistema é também incluída.

Uma motivação adicional, para incluir um capítulo desta natureza no trabalho, segue a linha adotada na dissertação, no sentido de tornar o texto uma referência básica para aqueles que se iniciam no tema, incluindo uma revisão dos principais assuntos relacionados aos testes reais de recomposição.

3.2 Componentes Básicos de uma Usina Hidrelétrica

Uma usina hidrelétrica pode ser dividida em blocos específicos em função de suas especificidades. Podem ser citados os seguintes blocos:

Tomada d'água: é uma estrutura, ligada às turbinas, que admite água para movimentação destas. A tomada d'água normalmente possui comportas com a finalidade de proteção e isolamento hidráulico da(s) unidade(s) geradora(s). Os tipos mais usuais de tomada d'água são:

- Torre (figura 3.1(a));

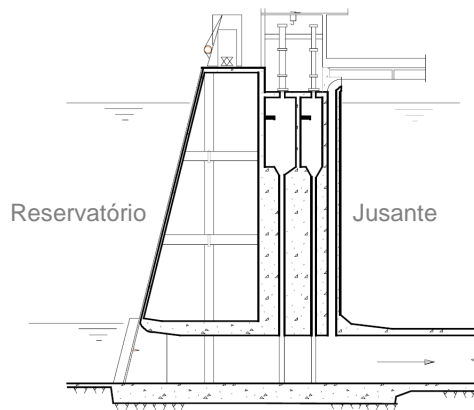
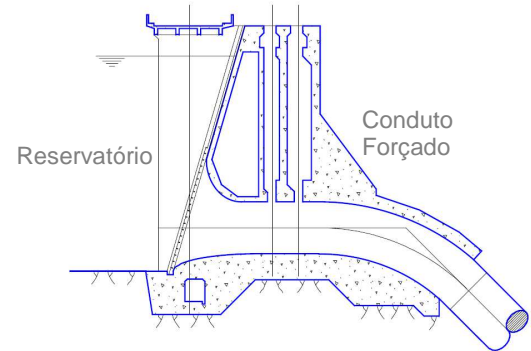
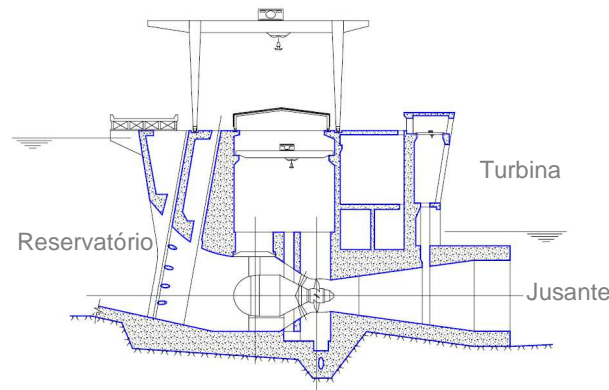
- Gravidade (figura 3.1 (b));
- Integrada à casa de força (figura 3.1 (c)).

(a) Tipo torre. **(b) Tipo gravidade.**

(c) Integrada à casa de força.

Figura 3.1 - Tipos de tomada d'água.
Fonte: [CEPEL, 2007]

Barragem: a principal função da barragem, na usina, é proporcionar o desnível da água a montante e a jusante, em função do qual é gerada a energia fornecida pela mesma. A interrupção do rio pela barragem pode ou não formar um reservatório que tenha como finalidade o armazenamento da água. Sendo assim, há dois tipos básicos de reservatórios:

Reservatório a Fio D'água: Não tem a função de acumular água; as usinas geram energia com o fluxo do rio, utilizando a velocidade da água; não são necessários grandes desníveis e, por isso, reduzem as áreas de alagamento.

Reservatório de Acumulação: Permite o acúmulo de água, possibilitando o armazenamento para utilização desta água para utilização nos períodos de seca; tal reservatório permite o armazenamento de energia e a regulação da vazão a ser turbinada, visando a uma maior autonomia sobre a geração.

Chaminé de Equilíbrio: tem a finalidade de estabilizar alterações de pressão na turbina que ocorrem em função de variações de vazão durante modificações de carga. Um exemplo de chaminé de equilíbrio é mostrado na figura 3.2.

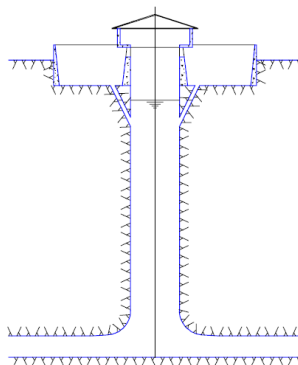



Figura 3.2 - Chaminé de equilíbrio.
Fonte: [CEPEL, 2007]

Casa de Força (figura 3.3): local no qual as UGs, bem como seus equipamentos periféricos, estão localizados. A água que passa pela tomada d'água é admitida na turbina, possibilitando seu giro e, consequentemente, a geração de energia elétrica. Ao passar pela turbina, a água é lançada no canal de fuga e pode ser usada ao longo restante do rio para outros fins.

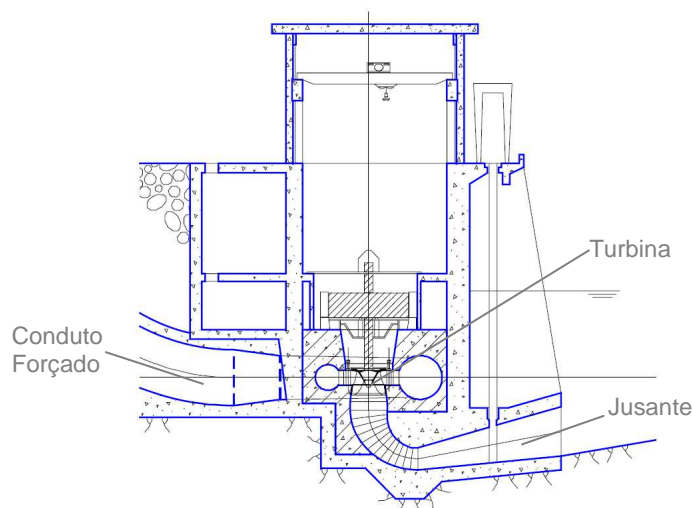



Figura 3.3 - Casa de força.
Fonte: [CEPEL, 2007]

Conduto ou Túnel Forçado (figura 3.3): o conduto forçado funciona sob pressão e tem a finalidade de ligar a casa de força à tomada d'água.

Canal ou Túnel de Fuga: local no qual a água, após turbinada, é lançada.

Vertedouro: estrutura civil onde são alocadas comportas que podem ser utilizadas para controlar o nível de água do reservatório. Normalmente o vertedouro (figura 3.4) é aberto por excesso de chuva, vazão de água de usinas a montante, atendimento a necessidades sociais para populações ribeirinhas ou navegação e manutenção do fluxo de água no rio.

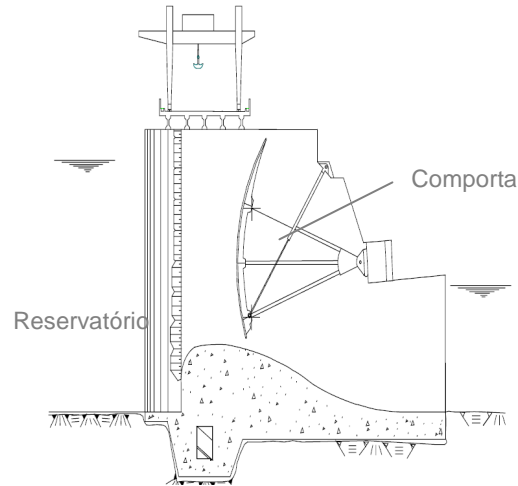



Figura 3.4 - Vertedouro.
Fonte: [CEPEL, 2007]

Setor de transformação: a energia elétrica gerada tem sua tensão elevada para transmissão e é, então, enviada para consumo.

A figura 3.5 ilustra os componentes básicos de forma integrada em uma usina hidrelétrica.

Figura 3.5 - Usina hidrelétrica.
Fonte: www.cemig.com.br

3.3 Sistemas e Circuitos de uma Usina Hidrelétrica

Os componentes básicos de uma UH, apresentados de forma macro no item anterior, são aqui mais detalhados. Este detalhamento permite a identificação, nos capítulos seguintes, das propostas desta dissertação, com vistas aos testes reais de recomposição. A Tabela 3.1 organiza os tópicos tratados, visando auxiliar a localização dos diversos itens analisados.

Tabela 3.1 - Sistemas e Circuitos de uma UH

Tópicos	Conteúdo
Serviço Auxiliar CA	Tipos de fontes de suprimento de energia
	Comutação entre fontes primária, secundária e de emergência
Serviço Auxiliar CC	
Turbina - Serviços Periféricos	Regulador de velocidade
	Sistema de vedação deslizante
	Mancais
	Trocador de calor
	Sistema de drenagem da tampa da turbina
	Cavitação e vórtices
Sistema de Excitação	
Sistema de Regulação de Velocidade	Sistema de ar comprimido
	Servomotores
Gerador - Serviços Periféricos	Polos do rotor
	Gaiola de amortecimento
	Estator
	Trocador de calor
	Anéis coletores
	Escovas
Sistema de Frenagem	
Transformadores Elevadores	Desumidificador
	Relé de gás ou relé bulchoz
	Comutador de tapes
	Radiadores e ventiladores
	Válvula de segurança
Sistema de Ar Comprimido	Compressores
	Secador de ar
Sistema de Água Industrial e de Resfriamento	
Tomada D'água - Serviços Periféricos	Bombas
	Estágios de abertura e fechamento
Vertedouro - Serviços Periféricos	Abertura e fechamento
Grupo Motor Gerador a Diesel de Emergência	
Sequência Genérica para Conexão e Desconexão de UG ao Sistema	Pré-condições de partida da UG
	Sequência de partida da UG
	Sequência de parada da UG

3.3.1 Serviço Auxiliar de Corrente Alternada

Os sistemas de serviço auxiliar podem ser em CA (corrente alternada) ou CC (corrente contínua). Ambos são essenciais para o processo de operação da usina e das unidades geradoras.

Neste item, ênfase é dada ao serviço auxiliar CA, em função do seu maior impacto para os testes reais de recomposição. O serviço auxiliar CC é tratado no item seguinte.

O serviço auxiliar CA é um conjunto de equipamentos e subsistemas que supre energia para as cargas essenciais à operação das unidades geradoras nas condições de gerador, compensador síncrono, em processo de partida ou processo de parada.

Numa perturbação, este sistema é essencial para a recomposição, pois no processo de parada da UG haverá o suprimento de cargas que assegurarão que a unidade seja desligada com segurança. Na partida é este sistema que fornecerá a energia para as cargas essenciais à partida, tais como bombas, exaustores, campo do gerador, dentre outras. O serviço auxiliar pode suprir, além das cargas essenciais para a UG, cargas que não são essenciais como ventiladores, ar condicionado e iluminação.

Para alcançar tal propósito, os sistemas de serviço auxiliar podem possuir várias fontes que comutam entre si em função da disponibilidade. Há diversas configurações deste sistema, como pode ser verificado em [ROCHA,2010]. Para demonstrar o funcionamento do serviço auxiliar CA é adotada a configuração apresentada na figura 3.6. A partir deste circuito inicial, ao longo do texto, as fontes disponíveis para suprimento terão suas condições alteradas e serão verificadas as configurações finais das chaves e disjuntores.

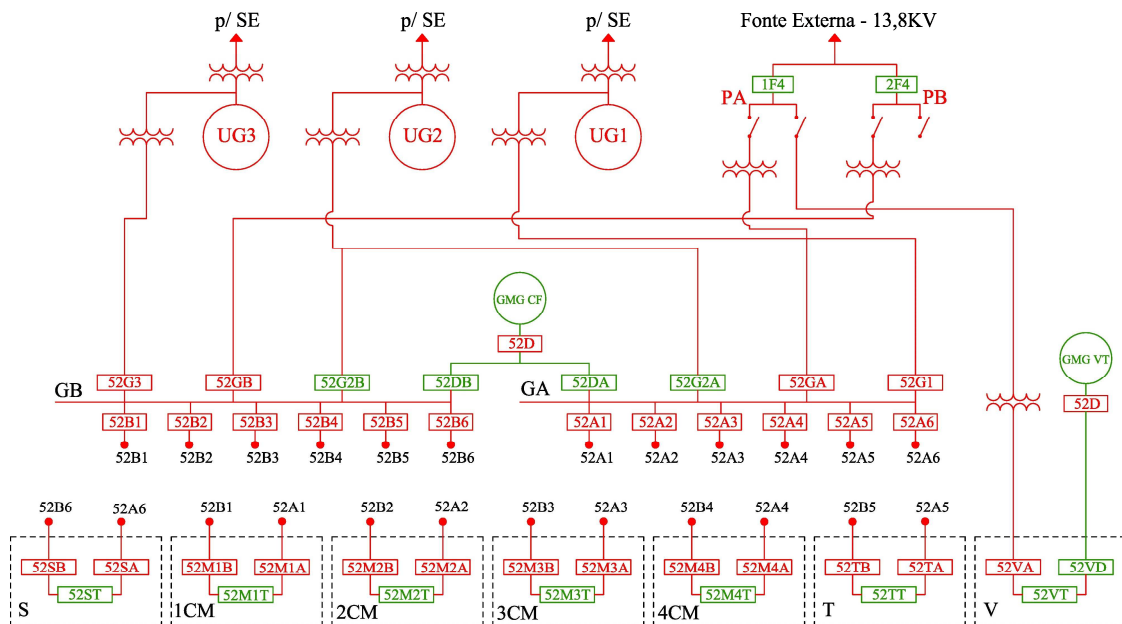



Figura 3.6 - Diagrama unifilar do serviço auxiliar CA.

Neste sistema de serviço auxiliar há seis fontes de alimentação: UG1, UG2, UG3, fonte externa (LD - Linha de Distribuição de 13,8kV), gerador diesel CF (Casa de Força) e gerador diesel VT (vertedouro). Na figura 3.6 os geradores diesel são denominados GMG. Este sistema tem configuração em barra dupla: barras GA (Barramento de Corrente Alternada do Lado A) e GB (Barramento de Corrente Alternada do Lado B). Estas barras podem ser supridas por quaisquer das fontes em operação. Tais fontes são classificadas de acordo com a hierarquia de assunção das cargas, conforme mostrado no item seguinte.

3.3.1.1 Tipos de Fontes de Suprimento de Energia

As fontes de suprimento para o sistema de serviço auxiliar são classificadas conforme hierarquia de alimentação [CUNHA, 2006]:

Fontes Primárias Internas
Fontes primárias internas podem ser dedicadas (suprindo exclusivamente um determinado barramento) ou compartilhadas (suprindo energia para dois ou mais barramentos).

Fontes Primárias Dedicadas (específica)
Para melhor entendimento das fontes primárias dedicadas, toma-se como exemplo a figura 3.6, na qual as fontes dedicadas são UG1 e UG3. Estas são denominadas dedicadas porque a UG1 supre exclusivamente a barra GA, e a UG 3 supre exclusivamente a barra GB.

Fontes Primárias Compartilhadas (comum)
Na figura 3.6 observa-se que a fonte compartilhada é a UG2 que pode suprir tanto a barra GA quanto a barra GB.

Fontes Secundárias Externas
As fontes secundárias externas são normalmente constituídas por uma linha de distribuição da concessionária local ou de outra UH. No sistema da figura 3.6, a fonte secundária é uma LD em 13,8kV para as barras PA e PB que provêm dos disjuntores 1F4 e 2F4, respectivamente. Para suprimento das cargas do vertedouro (ligadas à barra V) há uma derivação da barra PA. Em condições normais de operação, a barra V do vertedouro é suprida pela barra GA através do disjuntor 52GA e da chave 2F9.

Fontes de Emergência
A fonte de emergência é o grupo motor gerador a diesel que pode ser um único grupo (singelo) ou vários grupos em paralelo (usina diesel). O GMG é denominado, no contexto dos testes reais de recomposição, de recurso de autorrestabelecimento. Na figura 3.6, há dois GMGs, um no vertedouro e outro na casa de força. Estes entram em operação na ausência de tensão das fontes primárias e secundárias. Nas instalações, também há a possibilidade de se usar, como fonte de emergência, um banco de baterias. O GMG da casa de força destina-se a suprir as cargas essenciais da casa de força, tomada d’água e subestação. Supre as cargas da barra GA através do disjuntor 52DA e a barra GB através do disjuntor 52DB. O GMG do vertedouro destina-se a suprir as cargas da barra V através do disjuntor 52VD.

Cabe ressaltar que deve haver intertravamento elétrico de segurança entre as fontes primárias, secundárias e de emergência para evitar que haja duas fontes simultaneamente suprindo uma mesma barra.

A seguir são apresentadas as configurações possíveis advindas da hierarquia de prioridade das fontes.

3.3.1.2 Comutação entre Fontes Primária, Secundária e de Emergência

Para assegurar o fornecimento ininterrupto de energia elétrica para o serviço auxiliar CA, é utilizado um sistema de transferência automática entre fontes com disjuntores intertravados, de forma que sempre esteja suprindo uma barra apenas uma fonte. Na figura 3.6, em caso de indisponibilidade de uma das fontes, haverá transferência automática para a fonte seguinte, respeitada a ordem de prioridade preestabelecida, a saber:

- Fontes primárias dedicadas: UG1 e UG3;
- Fonte primária compartilhada: UG2;
- Fonte secundária: LD de 13,8 kV;
- Fonte de emergência: GMG da casa de força e GMG do vertedouro.

As comutações possíveis, no serviço auxiliar exemplificado, são registradas a seguir.

- Comutação Automática Considerando a UG2 Indisponível

Estando a UG2 fora de operação e as UG1 e UG3 em operação, a barra GA tem suas cargas supridas pela UG1, via disjuntor 52G1, e a barra GB tem suas cargas supridas pela UG3, via disjuntor 52G3. Os disjuntores 52G2A e 52G2B referentes à UG2 permanecem abertos.

A figura 3.7 mostra a configuração final com a UG2 fora de operação.

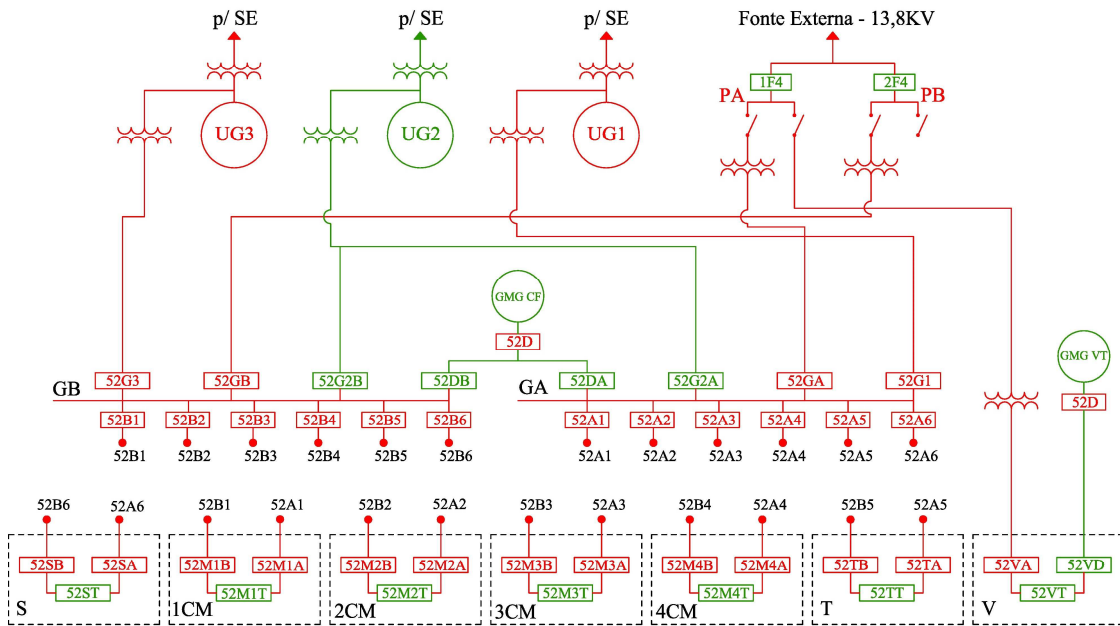



Figura 3.7 - Diagrama unifilar do serviço auxiliar CA com UG2 fora de operação.

- Comutação Automática Considerando a UG1 Indisponível

Estando a UG1 fora de operação e as UG2 e UG3 em operação, a barra GA tem suas cargas supridas pela UG2, via disjuntor 52G2A, e a barra GB tem suas cargas supridas pela UG3, via disjuntor 52G3. O disjuntor 52G2B referente à UG2 permanece aberto, pois as cargas da barra GB já estarão supridas através da UG3, via disjuntor 52G3. A figura 3.8 apresenta a configuração com a UG1 fora de operação.

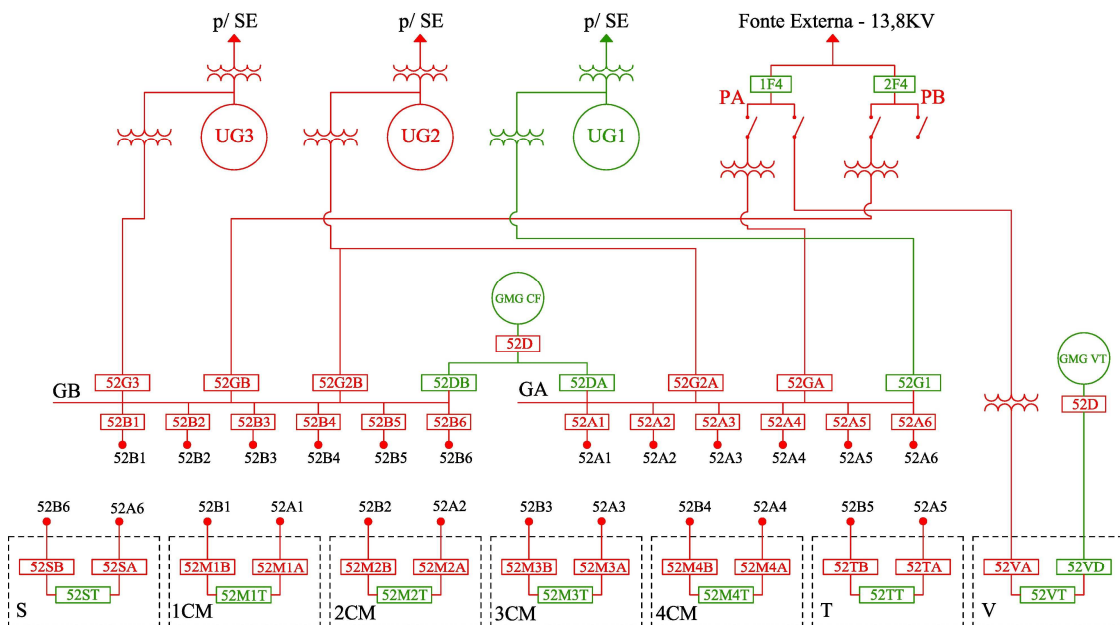



Figura 3.8 - Diagrama unifilar do serviço auxiliar CA com UG1 fora de operação.

- Comutação Automática Considerando a UG3 Indisponível

Estando a UG3 fora de operação e as UG1 e UG2 em operação, a barra GB tem suas cargas supridas pela UG2, via disjuntor 52G2B, e a barra GA tem suas cargas supridas pela UG1, via disjuntor 52G1. O disjuntor 52G2A referente à UG2 permanece aberto, pois as cargas da barra GA já estarão supridas através da UG1, via disjuntor 52GA. A figura 3.9 apresenta a configuração com a UG3 fora de operação.

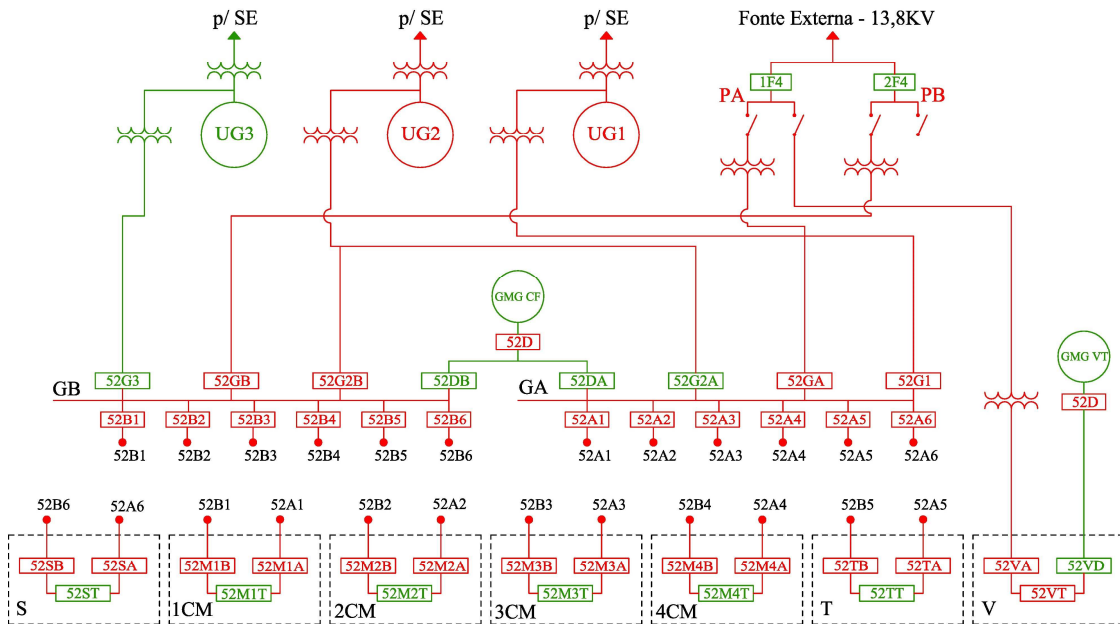



Figura 3.9 - Diagrama unifilar do serviço auxiliar CA com UG3 fora de operação.

- Comutação Automática Considerando UG1 e UG3 Indisponíveis

Estando as UG1 e UG3 fora de operação, as cargas das barras GA e GB são supridas pela UG2, via disjuntores 52G2A e 52G2B. A figura 3.10 mostra a configuração com a indisponibilidade das UG1 e UG3.

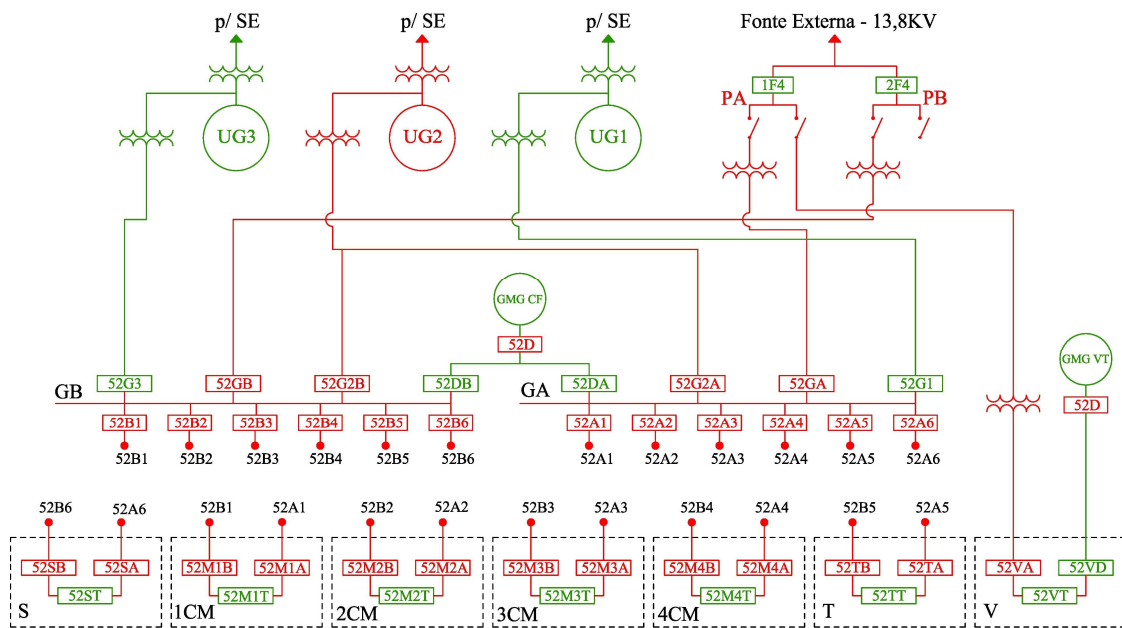



Figura 3.10 - Diagrama unifilar do serviço auxiliar CA com UG1 e UG3 fora de operação.

- Comutação Automática Considerando UG1, UG2 e UG3 Indisponíveis

Estando as UG1, UG2 e UG3 indisponíveis, os disjuntores 52GA e 52GB são mantidos fechados. As barras GA e GB têm suas cargas supridas pela fonte externa de 13,8kV, via disjuntores 1F4 e 2F4. Os disjuntores 52G1, 52G2A, 52G2B e 52G3 permanecerão abertos. A figura 3.11 apresenta a configuração com a indisponibilidade das UG1, UG2 e UG3.

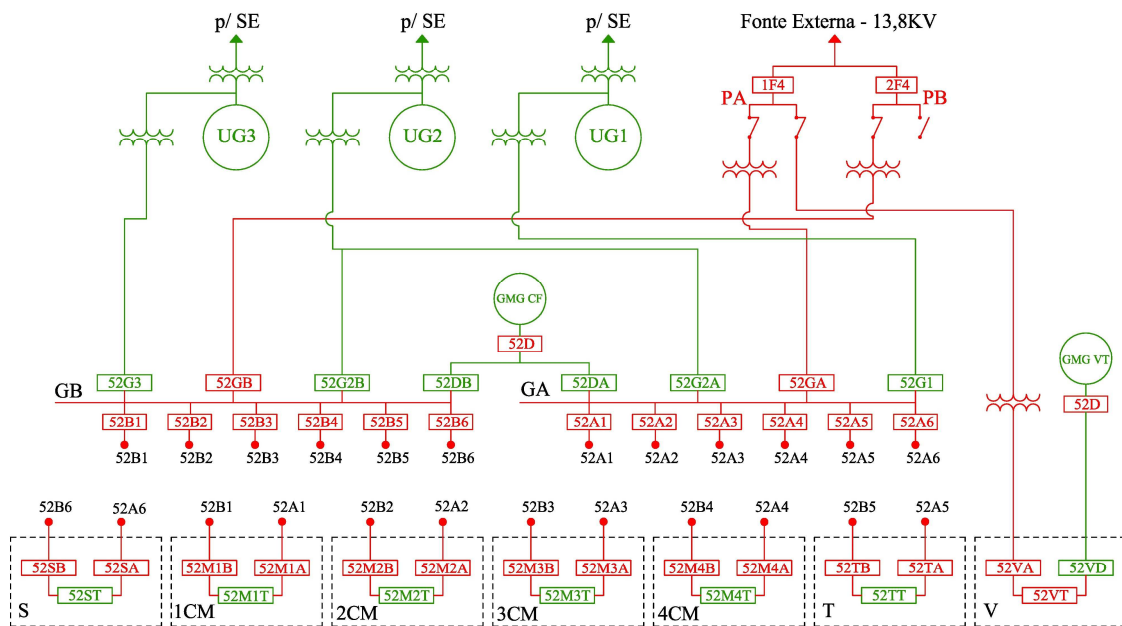



Figura 3.11 - Diagrama unifilar do serviço auxiliar CA com UG1, UG2 e UG3 fora de operação.

- Comutação Automática Considerando UG1 e UG2 ou UG2 e UG3 indisponíveis

Estando em operação apenas uma UG (UG1 ou UG2 ou UG3), esta assumirá todas as cargas do serviço auxiliar através da comutação dos disjuntores de final T. As figuras 3.12 e 3.13 apresentam as configurações estando apenas as UG1 e UG3 respectivamente em operação.

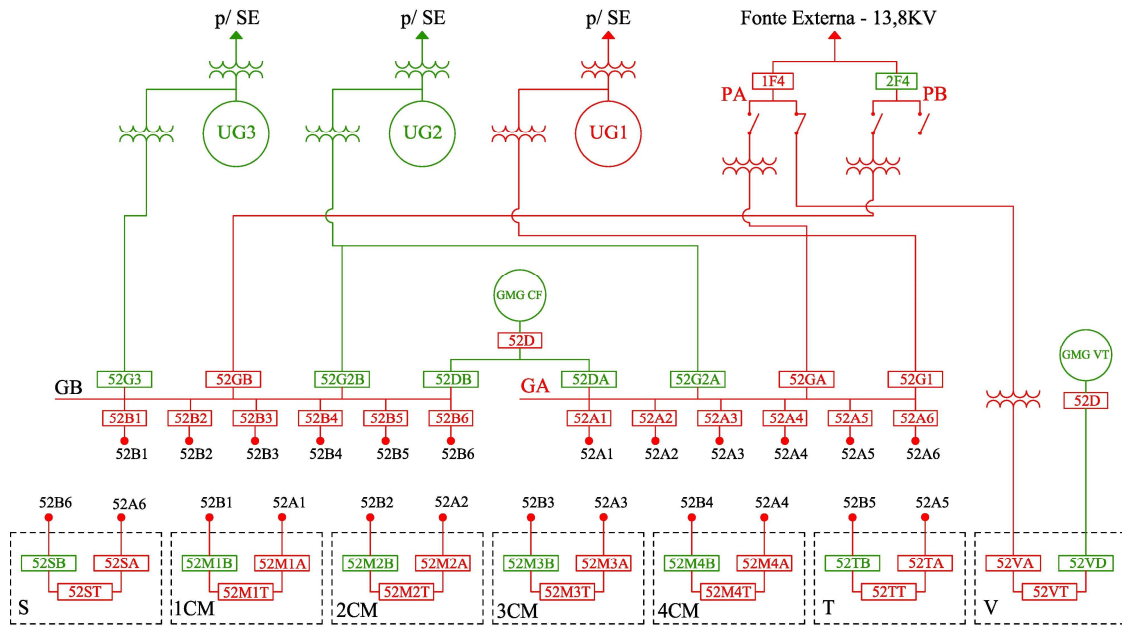



Figura 3.12 - Diagrama unifilar do serviço auxiliar CA com apenas UG1 em operação.

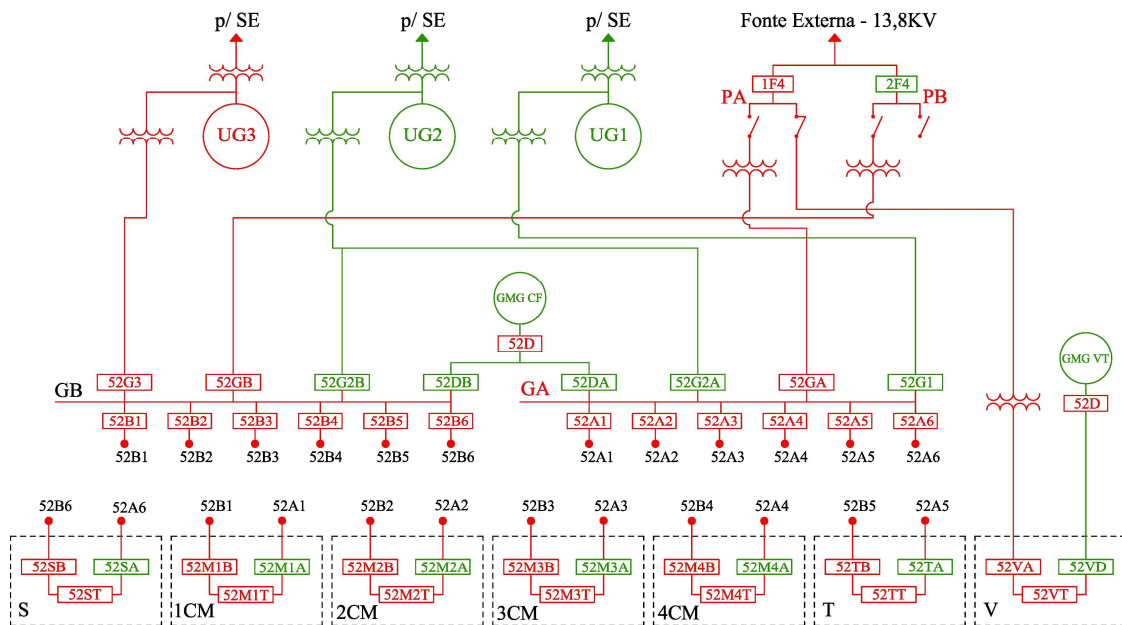



Figura 3.13 - Diagrama unifilar do serviço auxiliar CA com apenas UG3 em operação.

- Comutação Automática Considerando UG1, UG2, UG3 e LD de 13,8kV Indisponíveis

Ocorrendo indisponibilidade de todas as fontes prioritárias e secundária, haverá a entrada em operação dos GMGs da casa de força e do vertedouro que, depois de decorrido o tempo necessário para a transferência de fontes, assumirá apenas as cargas essenciais da casa de força, tomada d'água, subestação e vertedouro.

São denominadas cargas essenciais aquelas necessárias à parada e partida da UG, abertura e fechamento das comportas do vertedouro e tomada d'água. Após a partida do GMG da casa de força, e estando as barras GA e GB desenergizadas, os disjuntores 52DA e 52DB fecharão, suprindo as cargas essenciais das respectivas barras, provocando a atuação do dispositivo de alívio de carga.

O alívio de carga é efetuado em cada CM (Centro de Motores) desligando as cargas *não essenciais* (aquelas que não são relevantes para ligar a UG), reduzindo cargas que deverão ser supridas pelo GMG, e evitando que o mesmo desligue por uma sobrecarga durante parada ou restabelecimento das UGs. Observa-se que em algumas usinas tal alívio de carga deve ser feito manualmente.

A figura 3.14 apresenta a configuração com a indisponibilidade das UG1, UG2, UG3 e LD de 13,8kV.

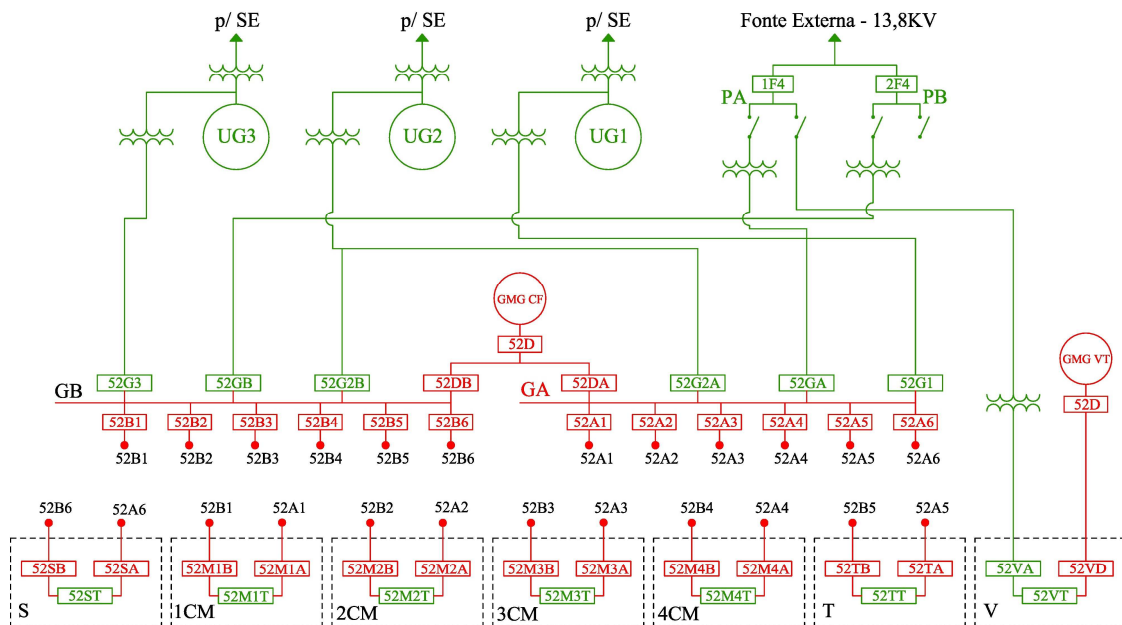



Figura 3.14 - Diagrama unifilar do serviço auxiliar CA com apenas UG3 em operação.

No contexto dos testes de recomposição, o serviço auxiliar CA é de fundamental importância. A falha de comutação entre as diversas fontes ou

abertura e fechamento de chaves e disjuntores pode comprometer toda a recomposição durante uma perturbação ou levar à reprovação da usina, tornando-a inapta para participar do processo de recomposição.

3.3.2 Serviço Auxiliar de Corrente Contínua

O serviço auxiliar em corrente contínua é um sistema que deve suprir energia em CC ininterruptamente e com qualidade a algumas cargas, geralmente em menor potência. Normalmente este sistema supre cargas como sistemas digitais de supervisão e controle, bobinas de abertura e fechamento de disjuntores, iluminação de emergência, sistemas de telecomunicação, sistemas de proteção, dentre outros. Para exemplificar o funcionamento do sistema de serviço auxiliar CC é utilizada a figura 3.15.

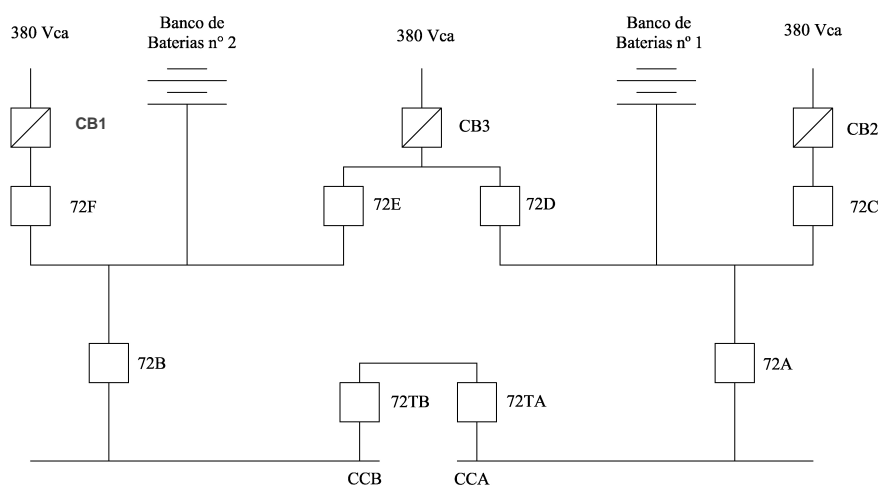



Figura 3.15 - Esquemático do serviço auxiliar CC.

Na figura 3.15, o serviço auxiliar CC tem como fonte os bancos de baterias nº 1 e nº 2 e os carregadores de bateria CB1, CB2 e CB3. Estes carregadores de baterias recebem energia em CA do serviço auxiliar CA e convertem para CC. Estas fontes suprem as cargas ligadas às barras CCA (Barramento de Corrente Contínua do Lado A) e CCB (Barramento de Corrente Contínua do Lado B). A figura 3.16 apresenta imagem das baterias e dos seus carregadores.

Figura 3.16 - À direita: três carregadores de baterias. À esquerda: baterias.

Assim como para o serviço auxiliar CA, cabe ressaltar que o sistema de serviço auxiliar CC é de extrema importância numa perturbação, uma vez que este suprirá cargas que contribuíram com o processo de recomposição, tal como o sistema de iluminação de emergência.

3.3.3 Turbina - Serviços Periféricos

Há diversos tipos de turbinas hidráulicas que variam quanto à posição (horizontal ou vertical) e ao tipo (Kaplan, Francis, Pelton, dentre outras). A turbina está conectada ao eixo que, por sua vez, está conectado ao gerador. Basicamente, a finalidade da turbina, numa unidade geradora hidráulica, é captar a água, através de um sistema de adução, proporcionando o giro do eixo que proporcionará a rotação do rotor do gerador, variando seu campo magnético. Esse processo resultará em energia elétrica.

Parte importante da turbina é o sistema denominado regulador de velocidade que atua nas palhetas do distribuidor admitindo mais ou menos água e proporcionando o controle da potência ativa da UG.

Para evitar que o fluxo da água de montante vá para as partes superiores da turbina, há um sistema denominado vedação deslizante. Este sistema de vedação consiste na injeção de água limpa sob pressão, na região entre dois anéis de carvão. A pressão da água eleva ligeiramente o conjunto do anel de vedação, fazendo fluir a água limpa na fresta formada. A água que flui pelos anéis escoa por gravidade através de uma tubulação para fora do poço da turbina, rumo aos poços de drenagem da usina. A alimentação de água para a o sistema de vedação deslizante deve ser mantida sempre em operação, mesmo durante a parada da UG, pois até mesmo com a UG parada, pode ocorrer fluxo de água de montante para as partes superiores.

Os anéis de vedação são estruturas sensíveis a grãos de areia que podem estar contidos na água de vedação. Desta forma, a água para vedação

deslizante deve ser filtrada. A figura 3.17 apresenta filtros denominados hidrociclone que têm a finalidade de fazer a filtragem da água para a vedação deslizante.

Figura 3.17 - Filtros hidrociclones.

Componente integrante do sistema da turbina é o mancal de escora que tem a finalidade de sustentar o peso das partes girantes da turbina garantindo estabilidade à mesma. É composto de sapatas e está continuamente submerso num reservatório de óleo. O óleo refrigerado é injetado através de bombas entre as sapatas.

Durante toda a operação da UG, o óleo deverá circular no mancal de escora. A temperatura, o fluxo e o nível de óleo são pré-condições para entrada e permanência em operação da UG. Assim, a bomba de alta pressão é uma carga essencial da usina e é normalmente suprida pelo serviço auxiliar CA.

A alimentação de óleo do mancal de escora deve permanecer constantemente ligada durante a operação da turbina, e esta receberá comando de desligamento em caso de falha neste sistema. Uma bomba acionada pelo motor elétrico succiona o óleo do tanque, fazendo com que o mesmo passe através dos trocadores de calor onde o óleo é refrigerado. Em seguida, ele passa por um filtro antes de ser injetado através das tubulações de alimentação no mancal de escora.

As figuras 3.18 e 3.19 apresentam, respectivamente, bombas do mancal de escora da turbina, localizadas sobre o tanque de óleo, e trocadores de calor para refrigeração do óleo do mancal de escora.

Figura 3.18 - Bombas do mancal de escora.

Figura 3.19 - Trocadores de calor do mancal de escora.

O trocador de calor em funcionamento utiliza água de refrigeração proveniente do sistema de água de serviço da usina. O excedente de óleo da cuba do mancal de escora retorna por gravidade ao reservatório. O nível de óleo na carcaça do mancal permanece praticamente constante durante a operação da turbina. A temperatura no tanque do mancal e a temperatura na cuba devem ser monitoradas.

Especificamente durante a sequência de partida e durante a sequência de parada da unidade geradora uma bomba de alta pressão, denominada bomba de injeção, injeta óleo no centro de cada sapata do mancal de escora para criar uma película de óleo, reduzindo o atrito.

Mesmo que uma perturbação leve ao desligamento total das UGs, faz-se necessário um suprimento de energia a fim de garantir o desligamento sem danos para os equipamentos.

Outro tipo de mancal é o de guia da turbina que tem a finalidade de suportar os movimentos radiais da mesma. O sistema de lubrificação deste mancal funciona por meio das bombas de circulação de óleo. O circuito de alimentação de óleo é composto por bombas que conduzem o óleo por tubulação até o trocador de calor onde é resfriado. Após o trocador de calor, o óleo passa por um filtro e, em seguida, retorna à câmara do mancal. O trocador de calor em funcionamento utiliza água de refrigeração proveniente do sistema de água de serviço da usina.

Em operação normal, pode haver acúmulo de água na tampa da turbina em função de obstrução na tubulação de drenagem ou por falha de alguma vedação. Um eventual acúmulo de água no interior da tampa da turbina é evitado pela drenagem por gravidade através de uma tubulação. Caso ocorra elevação anormal do nível de água no interior da tampa, um ejetor é acionado automaticamente. Se o nível de água continuar a subir, é acionada uma

bomba. Após a entrada em operação da bomba, ainda há outro dreno, por gravidade. Sendo assim, pode haver a seguinte sequência de drenagem:

- Dreno por gravidade 1;
- Ejetor;
- Bomba;
- Dreno por gravidade 2;
- Válvula de aeração.

Nesse contexto, é necessário definir os fenômenos cavitação e vórtice.

A cavitação é a formação de bolhas de vapor que ocorre no interior de sistemas hidráulicos. Durante o escoamento podem ser formadas regiões com pressão mais baixa. Caso a pressão abaixe até atingir a de vapor de fluido, formam-se bolhas de vapor. Com o escoamento, essas bolhas são carregadas para regiões com maior pressão. Quando a pressão torna a subir, as bolhas voltam a se condensar de maneira violenta o que causa um choque do líquido com as partes internas da UG. A cavitação pode causar queda do rendimento, queda da potência do eixo, vibração e ruído.

Os vórtices são causados por pressões mais baixas e se formam na saída do rotor. Estes são fluxos circulares que acabam por se fechar bruscamente com as estruturas de saída da água.

Para amenizar os efeitos dos vórtices e cavitações, pode ser instalada no topo do eixo uma válvula de aeração, cuja tubulação é ligada à atmosfera. Quando ocorre pressão negativa na turbina, o ar é automaticamente succionado para equalização de pressão. A abertura desta válvula é pré-condição para ligar a UG. Em algumas instalações são utilizados alternativamente compressores que injetam ar na saída de água da turbina a fim de perfurar as bolhas de baixa pressão. A figura 3.20 mostra uma válvula de aeração da turbina.

Figura 3.20 - Válvula de aeração.

3.3.4 Sistema de Excitação

O sistema de excitação é um conjunto de dispositivos e equipamentos que visam fornecer a corrente para a polarização do rotor (enrolamento de campo do gerador síncrono). Ao ser excitado, é induzida tensão no estator do gerador. Desta forma, este sistema fornece corrente contínua ao enrolamento de campo do gerador possibilitando a regulação da tensão e estabilidade em distúrbios. A tensão do gerador pode ser alterada por meio da variação da corrente no campo. Sendo assim, o regulador de tensão atua diretamente no controle de potência reativa. Vale ressaltar que a excitação inicial do gerador é uma pré-condição relevante e essencial para o processo de geração.

3.3.5 Sistema de Regulação de Velocidade

O sistema de regulação de velocidade opera controlando a rotação da turbina e consequentemente a potência ativa. Este é relevante porque outros sistemas poderão entrar em operação ou deixar de operar a partir da velocidade da turbina. É necessário que haja realimentação do parâmetro velocidade para a operação de outros sistemas. Logo, informações para o regulador de velocidade são relevantes, tais como: posição das pás, condição operativa do sistema de excitação e do sistema de frenagem, pré-condições para sincronismo com o SIN, comandos de parada por sobrevelocidade, entrada em operação da bomba de injeção, rotação da turbina.

Nos sistemas elétricos, ocorrem variações de carga e geração constantemente o que poderia levar a UG a variações bruscas de frequência. Para que isto não ocorra, o sistema de regulação de velocidade atua variando a quantidade de água na turbina através da movimentação de suas pás.

O regulador de velocidade aumenta a potência gerada admitindo mais água na turbina, através da abertura das pás, e diminui a potência gerada reduzindo a admissão de água através da redução da abertura destas. Atua observando em sua lógica digital as limitações da turbina e limites térmicos.

As pás da turbina são movimentadas normalmente através de um sistema contendo óleo pressurizado. Este é armazenado em tanques ar-óleo (figura 3.21) e é conduzido a servomotores através de dutos.

Figura 3.21 - Tanque ar-óleo para o sistema de regulação de velocidade.

A pressão do óleo no tanque é reduzida em função de *perdas hidráulicas*. Assim, automaticamente, uma válvula pode admitir ar para o tanque, recompondo o valor de pressão. Tal ar é proveniente do sistema de ar comprimido dedicado ao sistema de regulação de velocidade. Este sistema de ar comprimido possui um conjunto de compressores e um balão de ar sob pressão (figuras 3.22 e 3.23, respectivamente). Os compressores são responsáveis por manter a pressão de ar no regulador de velocidade em níveis aceitáveis.

Figura 3.22 - Compressores para o sistema de regulação de velocidade.

Figura 3.23 - Balão de ar para o sistema de regulação de velocidade.

Finalmente, os servomotores (figura 3.24), acoplados às pás da turbina, com óleo sob pressão em seus circuitos, recebem comandos do circuito digital do regulador de velocidade para movimentar as pás da turbina.

Figura 3.24 - Servomotores do sistema de regulação de velocidade.

3.3.6 Gerador - Serviços Periféricos

Os geradores são compostos de polos do rotor e do estator que são responsáveis por gerar a energia elétrica, disponibilizando-a aos terminais do transformador elevador.

Esse processo se dá na medida em que uma UG tem a turbina acoplada ao eixo que, por sua vez, está acoplado ao gerador. A água, ao passar pela turbina, gira também o rotor que provoca movimento no gerador. Estando os

polos do gerador excitados pelo regulador de tensão e os terminais do estator fechados, será induzida tensão no estator e esta será disponibilizada nos terminais do transformador elevador. As partes citadas podem ser vistas na figura 3.25.

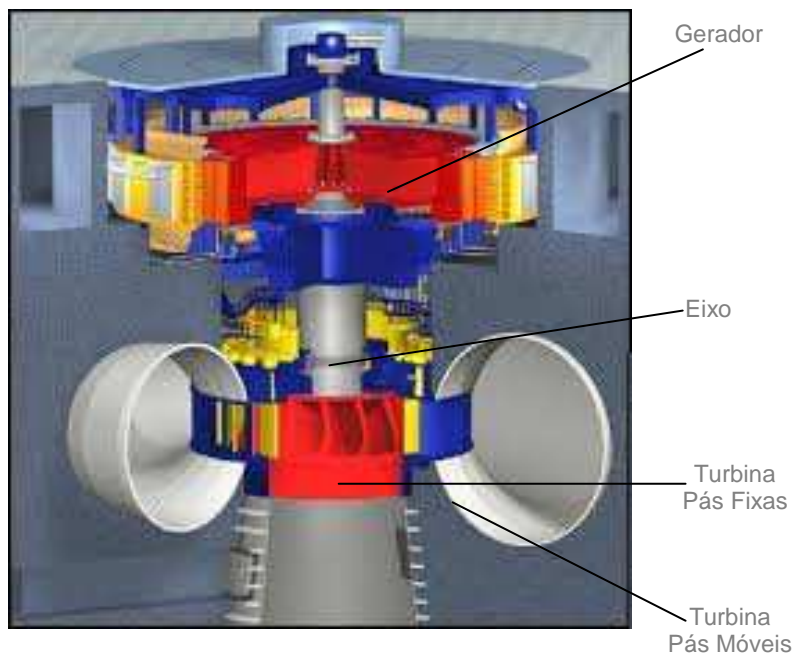



Figura 3.25 – Unidade geradora em corte.
Fonte: camacho.eng.br

Os polos do rotor contêm as sapatas polares, que, quando alimentadas em corrente contínua (através do sistema de excitação), geram o campo magnético girante. Adicionalmente, contêm o enrolamento de amortecimento, barras de cobre formadoras da gaiola de amortecimento fechada em si. O papel da gaiola é assegurar o amortecimento necessário dos campos magnéticos durante perturbações. Tal dispositivo tem o mesmo princípio de funcionamento do rotor do motor de indução do tipo gaiola. O enrolamento do estator é constituído de barras (figura 3.26). O ponto estrela é conduzido para fora, na forma de aterramento do neutro do gerador.

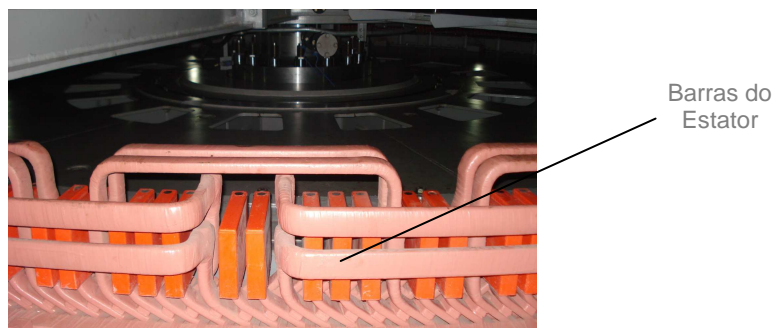



Figura 3.26 - Barras do estator.

Toda esta massa girante produz energia calorífica considerável. É necessário, portanto, um circuito de refrigeração para retirada do calor dissipado no gerador, o qual pode ser realizado por meio de trocadores de calor ar-água, como os mostrados na figura 3.27. Estes trocadores estão instalados na periferia do gerador.

Para que o rotor seja alimentado em corrente contínua e seja auto-excitado, fazem-se necessários os dispositivos denominados anéis coletores que são empregados em geradores com sistema de excitação estática. A transferência da corrente das partes fixas para as partes rotativas ocorre através de contatos deslizantes, que consistem de escovas fixas e de anéis coletores rotativos. Anéis coletores são apresentados na figura 3.28.

Figura 3.27 - Trocador de calor.

Figura 3.28 - Anéis coletores.

As escovas (figura 3.29), alojadas nos porta-escovas (figura 3.30), têm a função de conduzir a corrente aos anéis coletores.

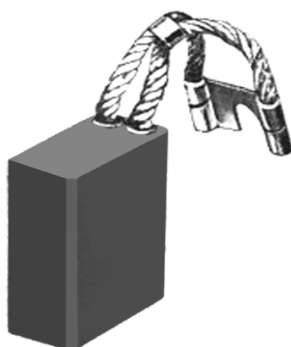



Figura 3.29 - Escova.

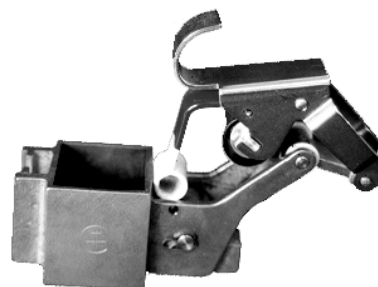



Figura 3.30 - Porta-escova.

O gerador ainda possui um mancal de guia que garante à UG uma rotação concêntrica e suave, com qualquer velocidade entre zero e a rotação de disparo da turbina. Ele absorve as forças radiais provenientes de pequenos e inevitáveis desbalanceamentos do rotor e de irregularidades magnéticas, causadas pelas tolerâncias inerentes ao processo de fabricação e montagem.

3.3.7 Sistema de Frenagem

O sistema de frenagem tem a finalidade de cessar a rotação da UG. Ele é composto por macacos de freio, alimentados por ar comprimido, e por um balão de ar. Os macacos de freio (figura 3.31) possuem contatos fim de curso para supervisão. Este sistema deve estar "desaplicado" quando a UG estiver operando como gerador ou compensador síncrono, e deve estar "aplicado" quando a UG estiver parada. A não "desaplicação" do sistema de frenagem constitui falta de pré-condições de partida para a UG e impede a sua ligação.

Figura 3.31 - Macaco de freio.

3.3.8 Transformadores Elevadores

O transformador elevador (figura 3.32) tem a finalidade de elevar o nível de tensão da energia gerada para que esta seja transmitida com menos perdas elétricas. Para desempenhar de forma adequada as suas funções, o transformador necessita dos diversos dispositivos periféricos que são apresentados a seguir.

Quando há elevação da temperatura, o volume de óleo aumenta e, nesta situação, pelo desumidificador passa ar para alívio da pressão interna do transformador. Quando a temperatura entra em declínio, o volume interno diminui e, neste caso, o ar ocupa o espaço deixado pelo óleo. Este processo é denominado respiração do transformador. Para que tal processo funcione corretamente, o desumidificador (geralmente à base de sílica-gel) retém a umidade do ar durante o processo de respiração do transformador. Este dispositivo é mostrado na figura 3.33. A umidade do ar altera a coloração da sílica-gel, indicando a necessidade de substituição.

Figura 3.32 - Transformador elevador.

Figura 3.33 - Desumidificador do transformador elevador.

O tanque de expansão tem a função de compensar as mudanças de nível de óleo do transformador em função das variações de temperatura, as quais, conforme já comentado, podem aumentar ou diminuir o volume do óleo. Este tanque de expansão (figura 3.34) comunica-se com a cuba do transformador através de uma tubulação na qual se localiza o relé de gás.

O relé de gás ou relé Bulchoz (figura 3.35), situado estrategicamente entre o tanque principal e o tanque de expansão, atua quando há formação de gás no interior do transformador. A atuação deste relé quase sempre significa defeito grave no transformador.

Figura 3.34 - Tanque de expansão do transformador elevador.

Figura 3.35 - Relé de gás.

O comutador de tapes (figura 3.36) tem a função de permitir mudanças da relação de espiras, conforme necessidade do sistema elétrico.

Figura 3.36 - Comutador de tapes.

O sistema de refrigeração dos transformadores é composto por radiadores e ventiladores localizados nestes radiadores. São três os modos de operação do sistema de refrigeração:

- ONAN (Óleo Normal Ar Normal): O resfriamento é feito naturalmente, sem a operação de ventiladores. O óleo circula por correntes de convecção através do núcleo e radiadores.
- ONAF (Óleo Normal Ar Forçado) I: O resfriamento é feito através de 50% dos ventiladores (figura 3.37) em operação. É denominado 1º estágio de refrigeração.
- ONAF II: O resfriamento é feito por 100% dos ventiladores em operação que fazem a circulação forçada do óleo através do núcleo e radiadores. É denominado 2º estágio de refrigeração.

Falhas no sistema de refrigeração podem provocar elevação de temperatura do óleo do transformador provocando limitação de geração ou desarme da unidade geradora pelo sistema de refrigeração.

A válvula de segurança (figura 3.38) está localizada no tanque do transformador e se abre quando há sobrepressão interna no transformador evitando assim a deformação do mesmo.

Figura 3.37 - Ventiladores.

Figura 3.38 - Válvula de segurança.

3.3.9 Sistema de Ar Comprimido

Os sistemas de ar comprimido de serviço normalmente são compostos por compressores (figura 3.39), tanque de ar comprimido (figura 3.39) e secador de ar (figura 3.40). Sua finalidade é suprir todo o ar comprimido para as diversas atividades da usina, tais como, limpeza e acionamento de válvulas.

Uma das válvulas que o sistema de ar comprimido pode acionar é a válvula de aeração da turbina. Como citado no item *Turbina*, esta válvula tem a finalidade de admitir ar para redução de vórtices e cavitações que podem danificar a turbina. Dependendo da filosofia do projeto, o não funcionamento adequado desta válvula constitui falta de pré-condição de partida para a unidade geradora.

O sistema de ar comprimido pode também ser dotado de um secador de ar (figura 3.40), instalado a partir de uma derivação após o tanque de ar, com a finalidade de fornecer ao sistema o ar mais isento possível de umidade. O vapor de água é condensado pelo resfriamento e depois removido.

Figura 3.39 - Compressores e tanque de ar comprimido.

Figura 3.40 - Secador de ar.

3.3.10 Sistema de Água Industrial e de Resfriamento das Unidades Geradoras

Uma unidade geradora produz muita energia calorífica especialmente pelo fato de haver grande quantidade de massa em movimento. Desta forma é previsto um sistema de resfriamento que pode ser por água ou óleo de refrigeração e trocadores de calor. Além da água para refrigeração, a usina também necessita de um sistema de água industrial para uso geral.

Um exemplo de sistema de água industrial e resfriamento é mostrado no diagrama da figura 3.41. Este sistema é formado pela rede principal de captação, tratamento e manipulação de toda a água requerida no interior da usina. Esta água não é aquela utilizada diretamente para a impulsão das turbinas. Normalmente, o sistema de água industrial e de resfriamento supre água para a refrigeração das unidades geradoras (regulador de velocidade e

mancais), SPCI (Sistema de Proteção Contra Incêndio), vedação deslizante (apresentada no item *Turbina*), limpeza e usos gerais na usina.

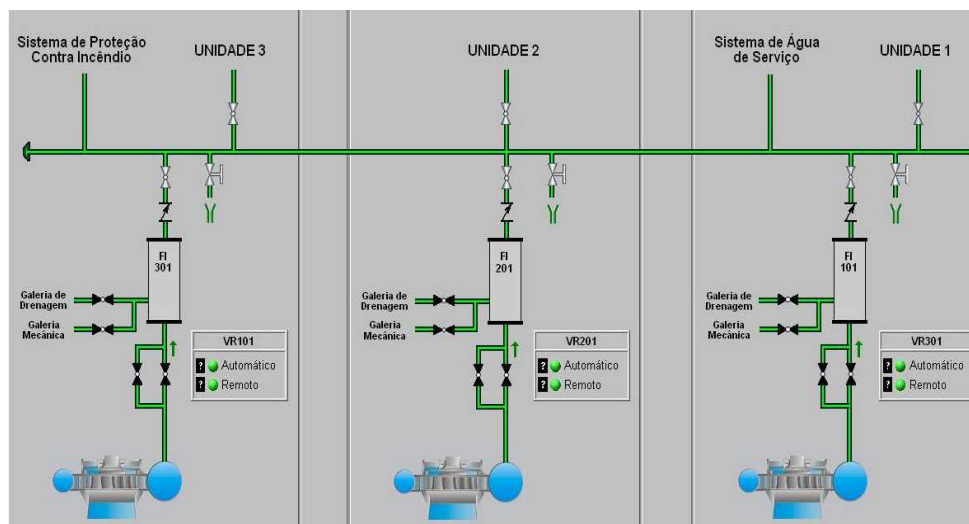



Figura 3.41 - Sistema de água industrial e resfriamento.

Neste sistema da figura 3.41, a água é captada pela força da gravidade proporcionada pela queda hidráulica da tomada d’água até a casa de força. A água requerida por ele é captada diretamente dos condutos forçados de cada UG.

No conduto forçado, no ponto onde nasce a rede de água industrial, há uma grade que impede o ingresso de objetos estranhos ao sistema. A habilitação da entrada de água é realizada por uma válvula. Depois da válvula, a água ingressa diretamente no filtro. Ao ingressar no filtro, a água é submetida a um processo de filtragem simples.

O sistema é provido de três filtros que estão interligados através de um coletor geral. Na manutenção de um ou dois filtros, é possível alimentar as UGs onde estes estão instalados, através dos outros dois, ou apenas de um. Na saída do filtro, a água já tratada passa por uma válvula de retenção e é direcionada ao coletor principal que se estende ao longo de toda a usina.

Desta forma, este coletor principal supre simultaneamente uma, duas ou três UGs, distintas daquela à qual pertence o filtro principal. No coletor geral há uma derivação que é o início da rede do sistema de água de serviço. Nesta rede, a maior vazão é utilizada para a alimentação do sistema de refrigeração da UG.

A água para refrigeração da vedação deslizante é coletada diretamente do coletor principal sem passar pelos filtros de água industrial, pois esta necessariamente passará pelo filtro hidrociclone (tratado no item *Turbina*). A água do sistema de refrigeração, depois de ter passado pelos vários sistemas, é canalizada para o rio.

O sistema de refrigeração é relevante à medida que altas temperaturas podem danificar os equipamentos a curto, médio e longo prazo que estejam submetidos a estas temperaturas. Adicionalmente, valores altos de temperatura podem levar a desligamentos intempestivos e falta de pré-condições de partida de unidades geradoras.

3.3.11 Tomada D’água - Serviços Periféricos

A captação da água para as turbinas requer um sistema que admita a água, mantendo uma pressão adequada para o giro da turbina. Esse sistema está alocado na estrutura denominada tomada d’água (figura 3.42). A tomada d’água geralmente contém comportas cuja função é liberar ou isolar a água para a turbina e, em casos de emergência, atuar como proteção mecânica do grupo turbina-gerador. A comporta da tomada d’água aberta é uma das pré-condições de partida da UG.

Figura 3.42 - Tomada d’água.

Na figura 3.43 são apresentadas comportas operadas verticalmente através de um pistão, o qual é hidraulicamente alimentado por duas centrais óleo-hidráulicas (figura 3.44).

Figura 3.43 - Pistões de acionamento das comportas da tomada d’água.

Figura 3.44 - Central óleo-dinâmica.

A explicação a seguir refere-se a um projeto específico que atende ao propósito desta dissertação, porque contém todos os periféricos que estão envolvidos com os requisitos e metodologias adotados na realização do teste.

Cada comporta da tomada d'água está conectada a um pistão que se movimenta dentro de um cilindro hidráulico. Há duas centrais óleo-dinâmicas que são interligadas entre si sendo cada uma composta por duas bombas que têm a finalidade de injetar óleo sob pressão na parte inferior do pistão. As bombas são assim denominadas:

Bomba de alta pressão ou *cracking*: Injeta óleo na abertura inicial da comporta e visa proporcionar pequena abertura inicial para equalizar a pressão de água dentro do conduto forçado, evitando golpes de aríete na tubulação.

Bomba de baixa pressão: Injeta óleo a partir da posição de *cracking* até a abertura total da comporta.

Desta forma, o processo de abertura da comporta se dá em dois estágios:

Primeiro: Efetua-se o comando de abertura e a bomba de alta pressão entrará em funcionamento e levantará a comporta até a posição de enchimento ou *cracking*. Após atingir esta posição, a bomba de alta pressão será desligada.

Segundo: Após o acionamento do fim de curso de *cracking* haverá nova abertura na comporta. Neste momento, a bomba de baixa pressão entrará em funcionamento e permanecerá até a abertura total da comporta. Isto só ocorrerá se estiverem satisfeitas as pré-condições de ausência de bloqueio mecânico de sobrevelocidade e pás da turbina fechadas.

O fechamento da comporta é realizado através da drenagem do óleo do pistão proporcionando a descida da comporta por gravidade. Estando a comporta na posição totalmente aberta, e se, por fugas de óleo do sistema, esta eventualmente vier a descer, a bomba de alta pressão entra em operação levando a comporta à posição totalmente aberta.

Caso haja falha no sistema de recuperação de posição e a comporta continuar a descer mais, é acionado alarme de falha na recuperação e é enviado um novo comando de partida para a bomba de alta pressão. Caso a comporta continue a descer, a bomba é desligada através do sensor de comporta a deriva.

Havendo falha no sistema de recuperação de posição e a comporta descer mais ainda, cortando o fluxo de água para a turbina, são atuados os sensores que, imediatamente, comandam o fechamento da comporta e o desligamento da UG. A lógica de abertura e fechamento das comportas da tomada d'água é feita através de sensores de posição, que podem ser do tipo mostrado na figura 3.45.

Figura 3.45 - Fins de curso.

3.3.12 Vertedouro - Serviços Periféricos

O Vertedouro (figura 3.46), conforme já introduzido, é uma estrutura civil que contém comportas (figura 3.47) com a finalidade de drenar água do reservatório.

Figura 3.46 - Estrutura civil do vertedouro.

Figura 3.47 - Comporta do vertedouro.

Há grande diversidade de projetos, mas, no sistema deste exemplo, o acionamento de cada comporta é feito por cilindros hidráulicos controlados por central óleo-dinâmica (figura 3.48) com duas bombas e, ainda, um conjunto motobomba para o caso de falta de energia.

Figura 3.48 - Central óleo-dinâmica do vertedouro.

A comporta possui sensores cuja função é confirmar a sua posição. Essas posições podem ser de comporta totalmente fechada, comporta totalmente aberta, comporta aberta extremamente.

Para o comando de abertura da comporta, o óleo proveniente da sucção da bomba vai direto aos cilindros hidráulicos. Quando atingida a posição desejada, a comporta cessa seu movimento de abertura.

Para o fechamento da comporta, ocorrerá liberação da drenagem do óleo das câmaras dos cilindros hidráulicos e, então, a comporta inicia seu movimento de fechamento. Quando a posição desejada é atingida, ocorre o comando de fechamento da drenagem de óleo e a comporta cessa seu movimento para fechar.

A abertura manual (e sem energia) da comporta poderá ser realizada através de vários dispositivos, dentre eles um grupo motobomba de emergência (figura 3.49) nas tomadas localizadas na central óleo-dinâmica. Caso, por perdas de óleo do sistema hidráulico, a comporta eventualmente vier a descer de sua posição aberta, o sistema de indicação e controle de posição, detectará a situação e recolocará a comporta à sua posição original.

Figura 3.49 - Motobomba de emergência.

3.3.13 Grupo Motor Gerador a Diesel de Emergência

Conforme já introduzido anteriormente, o grupo motor gerador é uma das fontes para o serviço auxiliar CA. Um exemplo de GMG é mostrado na figura 3.50. Normalmente, esta fonte entra em operação quando todas as demais fontes (primária e secundária) estão indisponíveis. Sua finalidade é, durante a partida, suprir energia para as cargas essenciais da UG e, durante a parada, suprir energia para as cargas que garantirão a parada com segurança. Como pode ser verificado no trabalho [CUNHA, 2006], os GMGs, como fonte emergencial, podem ser uma usina diesel (figura 3.51) que é composta por vários geradores diesel ligados em paralelo, ou apenas um GMG com maior potência.

Deve-se observar que a fonte emergencial, na rotina para realização dos testes de recomposição, é denominada recurso de autorrestabelecimento. Portanto, este recurso é relevante para que o processo de autorrestabelecimento seja executado com êxito nas usinas de autorrestabelecimento integral. A falha deste recurso pode comprometer todo o estado restaurativo do SIN. No Capítulo 4, as usinas de autorrestabelecimento integral são definidas de forma mais detalhada.

Figura 3.50 - Grupo motor gerador a diesel de emergência.

Figura 3.51 - Usina a Diesel.
Fonte: benco.com.br

3.4 Sequência Genérica para Conexão e Desconexão da Unidade Geradora ao Sistema

Os procedimentos para alterar a condição operativa das unidades geradoras são vários. Uma UG pode assumir diversas condições operativas, dentre elas: parada, interligada (como gerador ou compensador síncrono), girando a vazio mecanicamente ou girando a vazio excitada. A alteração da condição operativa da UG exige interação entre os diversos equipamentos e dispositivos apresentados neste capítulo.

Para que os objetivos deste trabalho sejam alcançados, é interessante verificar a interação dos sistemas envolvidos para retirar a UG da condição de parada para a condição de gerador. Esta é a mudança de estado mais crítica que ocorre no processo de recomposição da UG.

Ao longo deste capítulo, foram identificados alguns dispositivos e equipamentos que podem comprometer o processo de partida da UG, por implicarem pré-condições de partida insatisfeitas, ou seja, sistemas não prontos para entrar em operação em condições seguras e confiáveis, interrompendo a sequência de partida.

O primeiro passo para iniciar a ligação da unidade geradora é justamente que suas pré-condições estejam satisfeitas. As pré-condições de partida genéricas são listadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Pré-condições de Partida da UG

1	Proteções elétricas e mecânicas desoperadas e desbloqueadas
2	Seccionadora de aterramento de neutro do gerador fechada
3	Nível de óleo do reservatório do regulador de velocidade normal
4	Nível normal de óleo das cubas dos mancais
5	Válvula de água industrial em operação normal
6	Bombas de circulação de óleo dos mancais disponíveis para operação
7	Bomba de injeção de óleo disponível para operação
8	Bomba de óleo do regulador de velocidade disponível para operação
9	Comporta da tomada d’água aberta
10	Regulador de velocidade em operação normal
11	Pás da turbina disponíveis para operação
12	Válvula de aeração da turbina aberta
13	Fluxo normal de água da vedação do eixo da turbina
14	Regulador de tensão em operação normal
15	Tensão de alimentação normal para o sistema de proteção elétrica
16	Disjuntor de interligação da unidade geradora aberto
17	Sistema de sincronismo em operação normal

A sequência de partida da UG não é trivial e constitui-se num conjunto de passos intertravados entre si que podem ter início após todas as pré-condições de partida terem sido satisfeitas. A tabela 3.3 apresenta a sequência de partida genérica de uma usina contendo os passos, bem como suas respectivas consequências e finalidades.

Tabela 3.3 - Sequência de Partida da UG

Sequência de Partida	Consequência	Finalidade
Abertura da válvula de água industrial	Fluxo de água para os radiadores do gerador	Disponibilidade de água de refrigeração para a UG
	Fluxo de água para os trocadores de calor dos mancais	
Ligação dos auxiliares elétricos	Bombas de circulação de óleo dos mancais ligadas	Fluxo de óleo circulando nos mancais para refrigeração
	Bomba do regulador de velocidade ligada	Fluxo de óleo circulando no regulador de velocidade para controle das pás da UG
Desaplicação das travas do regulador de velocidade	Abertura da válvula de isolamento do regulador de velocidade	Partida do regulador de velocidade e giro da UG
	Desaplicação do sistema de frenagem	
Partida do sistema de excitação	Fornecimento de corrente contínua ao campo do gerador	Excitação do campo do gerador
	Sincronismo da UG ao SIN	Fornecimento de energia ativa e reativa

Estando a UG em operação e sincronizada ao SIN, a sequência de parada é a mostrada na tabela 3.4. Através desta sequência, a UG completa o processo de parada e, se houver pré-condições de partida, poderá novamente ser partida e sincronizada ao SIN conforme sequência apresentada na tabela 3.3.

Tabela 3.4 - Sequência de Parada da UG

Sequência de Parada	Finalidade
Redução da potência ativa da UG	Evita rejeição de carga e impactos no SIN, garante a estabilidade mecânica
Redução da potência reativa da UG	Evita impactos no SIN
Desconexão	Desinterliga a UG do SIN
Retirada da excitação do campo do gerador	
Desligamento do regulador de velocidade	
Aplicação do sistema de frenagem	Cessa a rotação da UG
Aplicação das travas do distribuidor	Impede o giro da unidade geradora
Fechamento da válvula de isolamento do regulador de velocidade	Impede o giro da unidade geradora
Desligamento dos equipamentos auxiliares	Economia de energia, pois não há finalidade destes estarem em operação

3.5 Considerações Finais

A descrição apresentada neste capítulo, sobre os equipamentos e dispositivos que influenciam o processo de operação de unidades geradoras, permite perceber a complexa interação entre eles

A plena disponibilidade e perfeita interação destes equipamentos é verificada durante a realização dos testes de recomposição. A experiência prática tem mostrado a importância de se prepararem as usinas, desde a etapa de projetos, para garantir que os dispositivos sejam projetados de forma a considerar a simulação das condições de contorno, para a efetiva execução dos testes de recomposição.

Com o conteúdo tratado até aqui neste texto, pode-se compreender de forma mais efetiva as diretrizes vigentes sobre os testes, discutidas no capítulo que se segue. Uma vez analisadas tais diretrizes, conclui-se a base para a apresentação da proposta da dissertação.

4 ANÁLISE DA ROTINA PARA EXECUÇÃO DOS TESTES REAIS DE RECOMPOSIÇÃO

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo descreve a rotina para a realização de testes reais de recomposição, a RO-RR.BR.01 [ONS, 2014]. Esta contém toda a metodologia relacionada aos testes, bem como as condições para a aprovação destes. A responsabilidade por sua elaboração é do ONS.

Conforme já comentado, a motivação inicial para a realização dos testes surgiu da ocorrência de uma perturbação de proporções sistêmicas [ONS, 2009], na qual os órgãos competentes do setor elétrico verificaram que muitas usinas, de diferentes agentes, não foram capazes de proceder ao autorrestabelecimento de forma satisfatória. Nesta ocasião, a rotina estava em sua décima segunda revisão. A partir deste evento, o ONS passou a fiscalizar de forma mais incisiva a realização dos testes, inclusive com presença *in loco*.

4.2 Testes de Recomposição - Conceitos Fundamentais

Apesar do uso, ao longo dos capítulos anteriores, de termos pertinentes ao tema, cabe aqui organizá-los, visando a uma melhor compreensão da rotina de testes.

Autorrestabelecimento:
"Capacidade de uma unidade geradora ou usina geradora de sair de uma condição de parada total para uma condição que permita a operação, independentemente de fonte externa na alimentação de seus serviços auxiliares. Diz-se, também, black start".
Fonte: [ONS, 2012]

Recomposição fluente:
"Primeira fase da recomposição do sistema interligado, em que os procedimentos operacionais, previamente estabelecidos, permitem a recomposição de áreas de autorrestabelecimento, de forma descentralizada, com o mínimo de comunicação das usinas e/ou subestações com os centros de operação".
Fonte: [ONS, 2012]

Recomposição coordenada:
"Segunda fase da recomposição do sistema interligado em que são efetuados, com a coordenação dos centros de operação, o fechamento de paralelos e anéis entre áreas e regiões, a liberação de restabelecimento de carga adicional e a intervenção na recomposição fluente, quando de impedimento no processo preferencial".
Fonte: [ONS, 2012]

Testes reais de recomposição:
São testes de recomposição das usinas de autorrestabelecimento integral e parcial podendo implicar desligamentos de outros equipamentos para simulação das condições de contorno para simular uma perturbação.

Recursos de autorrestabelecimento
São fontes de energia próprias da usina que têm a capacidade de suprir energia para as cargas essenciais de pelo menos uma unidade geradora. Os recursos de autorrestabelecimento permitem à UG sair da condição de parada total para a condição de sincronismo ao SIN. Tais recursos podem ser: GMG, UG auxiliar ou sistema de partida com alimentação em corrente contínua.

Usinas de autorrestabelecimento integral:
São usinas que possuem alta confiabilidade de restabelecimento devendo ser submetidas aos testes de autorrestabelecimento integral individual-simultâneo.

Usinas de autorrestabelecimento parcial:
São usinas que possuem média confiabilidade de restabelecimento devendo ser submetidas aos testes de autorrestabelecimento parcial individual-simultâneo.

Usinas sem autorrestabelecimento:
São usinas de baixa confiabilidade que, numa perturbação real, para ter suas UGs recompostas, necessitam de alimentação externa para seus serviços auxiliares. Estas usinas não são submetidas a testes de autorrestabelecimento.

As unidades geradoras das usinas de autorrestabelecimento integral, durante uma recomposição real, devem ter condições de serem recompostas em até 30 minutos quando suas unidades geradoras estiverem desligadas elétrica e mecanicamente, independentemente de se utilizar qualquer alimentação externa para suprir os seus serviços auxiliares. Portanto, estas usinas podem, com seus próprios recursos de serviços auxiliares, interligar ao SIN o número mínimo de UGs definido na instrução de recomposição da área na qual está inserida.

Estas usinas são classificadas, a partir de estudos elétricos feitos pelo ONS, para participar do processo de recomposição durante a fase fluente. Elas devem energizar os elementos da rede adjacente sem ter que considerar nenhum evento que esteja fora do seu controle e de assimilar variações bruscas de carga controlando tensão e frequência dentro das faixas definidas para situação de emergência.

As usinas de autorrestabelecimento integral devem ser providas de recurso de autorrestabelecimento. Este recurso, como visto anteriormente, provê energia para as cargas essenciais de pelo menos uma unidade geradora. Os recursos de autorrestabelecimento normalmente são GMGs ou unidades geradoras auxiliares, ou ainda sistema de partida com alimentação em CC (através de banco de baterias) para excitação do campo do gerador.

A rotina para testes reais de recomposição ainda exige que esses recursos de autorrestabelecimento efetuem pelo menos duas tentativas de

recomposição da UG, sem o auxílio de fonte de alimentação externa. Este critério visa considerar o insucesso da primeira tentativa de ligação e necessariamente o sucesso da segunda tentativa.

Adicionalmente, de nada adianta classificar uma usina como de autorrestabelecimento integral se ela não tem bom desempenho, ou seja, se ela possui constantes falhas que levem à sua indisponibilidade. Desta forma, estas usinas, na rotina atual, devem ter índice de disponibilidade no ano anterior superior a 80%.

Com relação às usinas de autorrestabelecimento parcial, estas participam do processo de recomposição durante a fase coordenada, em complementação ao processo de recomposição, e devem permanecer girando mecanicamente e excitadas pelo tempo mínimo determinado na rotina.

Numa perturbação real, é considerado que estas usinas não pararão completamente, ou seja, estas permanecerão girando a vazio. Entretanto, nem sempre esta situação ocorre e, realmente, a usina pode parar completamente, necessitando de energia para iniciar o seu restabelecimento. Cabe observar que estas usinas não necessitam possuir recurso de autorrestabelecimento.

As usinas termoelétricas poderão, em casos excepcionais, ser indicadas e consideradas como usina de autorrestabelecimento. Entretanto, este trabalho trata exclusivamente de unidades geradoras hidráulicas.

Com relação aos tipos, a rotina operacional para testes reais de recomposição aborda dois tipos de testes: integral e parcial. Estes têm o propósito de assegurar que as UGs e equipamentos, inclusive de autorrestabelecimento, estejam funcionando adequadamente, de forma a contribuir com a recomposição da área onde estão inseridas, durante uma perturbação real.

Os testes reais de recomposição integrais ou parciais de usinas de autorrestabelecimento se caracterizam por serem realizados anualmente e, necessariamente, devem ser realizados testes individuais e teste simultâneo. Adicionalmente, a condição do SIN durante o teste deve ser normal e seguro, ou seja, o ONS contempla a preparação do SIN para eventuais contingências associadas ao evento.

Para explicar os procedimentos de simulação das condições de perturbação, os itens seguintes abordam, tanto para os testes parciais quanto para os integrais, a seguinte sequência: metodologia, etapas dos testes e condições de aprovação.

4.3 Metodologia para Realização dos Testes Integrais

4.3.1 Etapas dos Testes para Usinas de Autorrestabelecimento Integral

As usinas de autorrestabelecimento integral devem ser submetidas ao teste integral-individual e ao teste integral-simultâneo. Para ambos os testes, a condição inicial é que a usina esteja interligada ao SIN e, preferencialmente, com potência próxima a zero, para evitar rejeições de carga.

Teste integral individual

O teste integral individual verifica se cada UG, individualmente, está apta a ser conectada em barra desenergizada em um tempo máximo determinado pela rotina (atualmente, é de 30 minutos). A UG a ser interligada deve ser capaz de suprir as cargas do serviço auxiliar CA e estar apta a partir com o recurso de autorrestabelecimento da usina.

Teste integral simultâneo

O teste integral simultâneo verifica a capacidade dos equipamentos em recompor simultaneamente o número mínimo de unidades geradoras determinado para iniciar e concluir o processo de recomposição da área onde a usina está instalada. A exemplo do individual, este teste obrigatoriamente deve ser realizado em barra desenergizada (barra morta), situação esta que é verificada quando da ocorrência de uma perturbação ou distúrbio sistêmico. Depois de sincronizada a última UG, deve ser aguardado um tempo mínimo com as UGs ligadas na barra morta para verificação da estabilidade. Na versão atual da rotina este período é de 60 segundos.

Nas usinas de autorrestabelecimento integral, que possuem como fonte para partida da primeira UG um grupo gerador de emergência, deve ser assegurado que este esteja apto para realizar pelo menos duas partidas para recomposição da unidade, sem o auxílio de fonte de alimentação externa. O GMG tem como requisito a obrigatoriedade de ser acionado uma primeira vez, para realização do teste integral individual, e uma segunda vez, para realização do teste integral simultâneo. Geralmente o GMG tem o seu campo suprido por uma fonte CA, que passa por um retificador transformando-a em CC, e outra por um banco de baterias. O banco de baterias é o dispositivo que estará em operação independente de distúrbios. Portanto, em ambos os testes, o suprimento CA (retificado para CC) para o campo do GMG deve ser desligado, e mantido apenas o suprimento autônomo (geralmente baterias).

4.3.2 Condições para Aprovação dos Testes Integrais

Os resultados dos testes reais de recomposição integrais podem ser classificados como aprovado, aprovado com ressalva ou não aprovado. Para o caso de aprovação com ressalva o agente responsável deve corrigir as falhas verificadas, mas não há necessidade de repeti-lo. Nos casos de testes

classificados como não aprovados, as falhas devem ser corrigidas e o teste repetido.

O teste integral é classificado como aprovado quando:

- Os tempos totais de realização dos testes forem inferiores ao tempo mínimo determinado pela rotina, ou seja, a usina tem capacidade de ser restabelecida numa perturbação real em até 30 minutos (período atual da rotina);
- O índice de disponibilidade da usina no ano anterior à realização do teste for igual ou superior a 80%, ratificando que, ao longo dos meses, a usina tem boa disponibilidade;
- O recurso de autorrestabelecimento tiver efetuado pelo menos duas partidas, sem o auxilio de fonte de alimentação externa.

O teste integral é classificado como aprovado com ressalva, quando for classificado como aprovado conforme requisitos acima, mas:

- Um ou mais testes individuais não tenham sido classificado como aprovado ou
- O índice de disponibilidade da usina no ano anterior foi inferior a 80%, o que denota que esta usina não tem apresentado desempenho satisfatório de suas unidades geradoras.

O teste integral é classificado como não aprovado quando este não for classificado como aprovado, independentemente da classificação dos individuais, ou quando o GMG não comprovar o requisito de pelo menos duas partidas. Nesse caso, o ONS pode optar por reclassificar esta usina, ainda que temporariamente, e relocar a atribuição desta para outra usina que esteja apta.

4.4 Metodologia de Realização dos Testes Parciais

O teste de autorrestabelecimento parcial consiste em verificar se, durante uma perturbação real, a UG tem a capacidade de permanecer girando a vazio e excitada, pelo tempo mínimo proposto na rotina, que atualmente é de 30 minutos. Este é um pré-requisito da rotina. Entretanto, numa perturbação real, a unidade geradora poderá parar.

4.4.1 Etapas dos Testes para Usinas de Autorrestabelecimento Parcial

Similarmente aos testes integrais, os testes parciais também devem ser iniciados com as unidades geradoras interligadas ao SIN. O teste parcial individual deve ser executado individualmente, nas unidades geradoras que possuem derivação para o serviço auxiliar, e o simultâneo entre o número mínimo de unidades geradoras constante na rotina operacional. Para ambos os testes, as UGs devem permanecer girando a vazio e excitadas por, pelo menos, 30 minutos (período atual constante na rotina).

4.4.2 Condições para Aprovação dos Testes Parciais

Assim como os testes integrais, o teste parcial pode ser classificado como aprovado, aprovado com ressalva e não aprovado.

É classificado como aprovado quando, nos testes parciais individuais, todas as unidades geradoras, que possuem derivação para o serviço auxiliar, permanecerem girando mecanicamente e excitadas por um tempo mínimo de 30 minutos. Esse tempo corresponde ao momento compreendido entre a abertura do disjuntor e a sincronização da UG ao SIN. O número mínimo de UGs é estabelecido na Instrução de Operação da área onde a usina está instalada.

O teste parcial é classificado como aprovado com ressalva quando o teste parcial simultâneo for classificado como aprovado, mas um ou mais testes parciais individuais não for classificado como aprovado. Nesse caso, o agente responsável deve corrigir as falhas e defeitos. Entretanto, não há necessidade de o teste ser refeito.

O teste parcial é classificado como não aprovado quando o teste parcial simultâneo não for classificado como aprovado, independentemente da classificação dos testes parciais individuais. Nesse caso o agente de geração proprietário da usina deve priorizar a correção das falhas e defeitos e refazer os testes parciais individuais e simultâneo.

4.5 Considerações Finais

Observando as condições para realização e aprovação dos testes reais de recomposição, pode-se pensar que não há dificuldades para sua execução e aprovação. Entretanto, este entendimento é um equívoco, conforme registrado nos trabalhos [SOUZA, 2012], [SOUZA, 2012a] e [SOUZA, 2012b].

Os gráficos das figuras 4.1 e 4.2, adaptados de [VERBOONEN, 2012], também comprovam que algumas usinas nem realizaram seus testes, ou os realizaram e estes não foram aprovados.

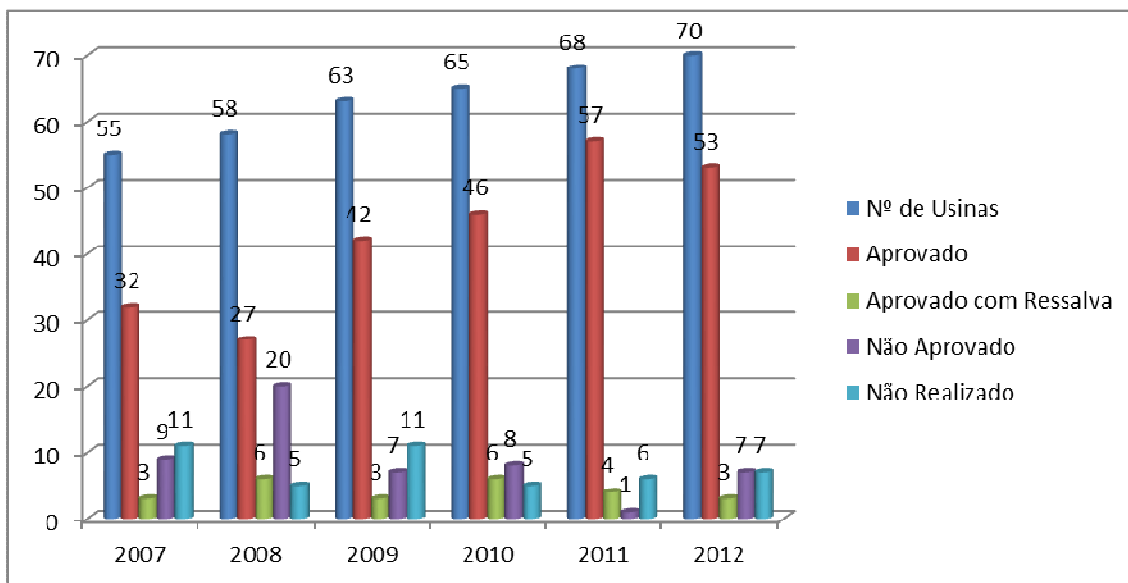



Figura 4.1 - Condição dos testes de recomposição no SIN.
Fonte: adaptado de [VERBOONEN, 2012]

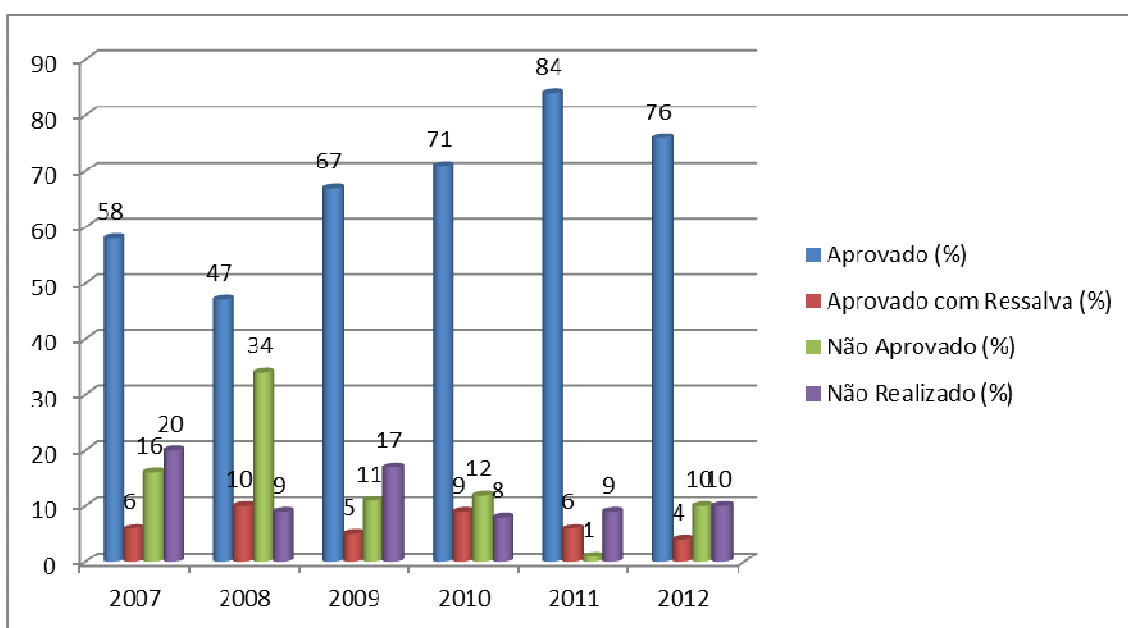



Figura 4.2 - Condição dos testes de recomposição no SIN em %.
Fonte: adaptado de [VERBOONEN, 2012]

Em 2012, 10% dos testes não foram aprovados e a mesma porcentagem de testes não foi realizada. Este resultado não assegura confiabilidade para o SIN porque, dependendo da sua importância, uma usina em falha, durante uma perturbação real, pode comprometer o restabelecimento da área onde está instalada. Desta forma, o ONS, ao verificar a reprovação ou a não execução dos testes avalia reclassificar a usina quanto à sua participação no processo de recomposição durante uma perturbação real.

As dificuldades são oriundas, principalmente, de projetos que não contemplam a necessidade futura de realização dos testes, exigindo que os

agentes de geração elaborem estratégias que sejam seguras para a simulação das condições de perturbação. Nem sempre a formulação de tais estratégias é factível.

Alguns problemas, para execução dos testes reais de recomposição, já podem ser identificados: configuração dos barramentos da subestação, configuração do serviço auxiliar da usina, autonomia do GMG para suprimento de cargas essenciais, consumidores supridos radialmente pela usina, dentre outros. Estes poderiam ser evitados, se a perspectiva de testes já fosse considerada na etapa de projetos.

Adicionalmente, vale comentar que, ao longo dos anos, o sistema elétrico de potência tem passado por profundas mudanças tanto na legislação quanto na parte técnica. Nesse contexto, cabe uma mudança de paradigma quanto ao projeto de usinas hidrelétricas, com vistas à realização dos testes de recomposição, pois a execução e aprovação dos mesmos são de extrema importância para garantia da confiabilidade do SIN.

Considerando que, durante uma perturbação, as usinas classificadas devem ter condições de proceder a uma recomposição evitando danos à própria empresa, consumidores e à sociedade pela falta de suprimento de energia, cresce em importância a abordagem adotada nesta dissertação. Com o propósito de revisar alguns conceitos relevantes para este trabalho, o capítulo seguinte apresenta as diretrizes atualmente vigentes para projetos de usinas.

5 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS DIRETRIZES PARA PROJETOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS NA PERSPECTIVA DOS TESTES DE RECOMPOSIÇÃO

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentadas as diretrizes vigentes para elaboração e execução dos projetos de usinas hidrelétricas com o objetivo de investigar aquelas que possam impactar, e de que forma o podem, a realização dos testes reais de recomposição.

Experiências com usinas hidrelétricas demonstram que algumas configurações facilitam a realização dos testes. Sendo assim, torna-se importante estudar as diretrizes pertinentes, para identificar os circuitos e sistemas que favorecem a realização dos testes de recomposição. Adicionalmente, a partir do conhecimento destas diretrizes, é possível propor estratégias às áreas de projeto.

Nesse contexto, são apresentadas as etapas para execução do projeto de usinas hidrelétricas até a sua entrada em operação, bem como os documentos utilizados para verificação das diretrizes para os projetos.

Dentre as etapas, destaca-se aquela relativa ao Projeto Básico, especialmente a investigação dos critérios gerais adotados. Vale ressaltar que, neste trabalho, as diretrizes de interesse são aquelas que orientam quanto ao projeto de equipamentos eletromecânicos.

5.2 Etapas Básicas para Implantação de Usinas Hidrelétricas

O processo de implantação de uma usina hidrelétrica não é trivial, envolve muitas entidades e passa pelas seguintes fases: [ANEEL, 1998], [ANEEL, 2005], [ANEEL, 2009], [ANEEL, 2010] e [ANEEL, 2013a]

Etapa 1: Estimativa do potencial hidrelétrico;

Etapa 2: Inventário hidrelétrico;

Etapa 3: Viabilidade;

Etapa 4: Projeto Básico;

Etapa 5: Projeto executivo.

O projeto de implantação de um empreendimento hidrelétrico tem início com uma análise preliminar, feita em escritório, denominada Estimativa do Potencial Hidrelétrico, na qual é verificada a vocação para geração de energia elétrica com relação aos aspectos de meio ambiente, hidrologia, topologia e geologia.

A etapa seguinte analisa uma série de possíveis quedas na bacia hidrográfica. As selecionadas serão as que possuem menor impacto ambiental, menor custo e maior benefício energético. Esta etapa corresponde ao Inventário Hidrelétrico. Esta tem como produto uma série de aproveitamentos com dados caracterizados que passam a ser classificados como inventariados e poderão compor os planos de expansão do setor.

A próxima etapa, denominada Viabilidade, consiste em identificar o empreendimento ótimo do ponto de vista social, ambiental, técnico, energético e econômico. Este empreendimento passará pelo leilão de energia. Essa fase investiga os dimensionamentos necessários à implantação do empreendimento:

- Dimensionamento das obras de infraestrutura;
- Dimensionamento do reservatório;
- Dimensionamento da área de influência;
- Dimensionamento do aproveitamento;
- Usos múltiplos da água;
- Interferências sociais;
- Interferências ambientais.

Na etapa de Viabilidade, são elaborados relatórios importantes tais como o RIMA (Relatório de Impacto Ambiental) e o EIA (Estudo de Impacto Ambiental), os quais constituem a base para a obtenção da LP (Licença Prévia), junto aos órgãos ambientais.

Após a etapa de Viabilidade, tem início o Projeto Básico, no qual ocorre maior detalhamento das especificações técnicas de obras civis e eletromecânicas. Nessa fase também deve ser elaborado o Projeto Básico Ambiental que visa a detalhar as recomendações do EIA para obtenção da LI (Licença de Instalação). Durante o Projeto Básico são especificados os equipamentos apresentados no capítulo 3.

Esta etapa é de especial interesse para este trabalho. Pretende-se apontar as diretrizes que contemplem a necessidade de realização dos testes reais de recomposição. Por esse motivo, a etapa Projeto Básico é detalhada no item 5.3.

A próxima etapa é denominada Projeto Executivo. Nesta, são implementados os programas socioambientais. Adicionalmente elaboram-se

todos os desenhos eletromecânicos e civis necessários à montagem dos equipamentos e implementação da obra. Desta fase resulta a LO (Licença de Operação). A usina somente poderá entrar em operação com a LO liberada.

Após o término da construção, o reservatório passa pelo enchimento, ficando a usina preparada para a fase de operação.

5.3 Diretrizes para Elaboração do Projeto Básico - Aspectos Institucionais e Legais

As diretrizes propostas pelas instituições e órgãos do setor têm caráter geral, não dependem do tipo de pessoa jurídica (empresa estatal ou privada) que irá realizar o inventário hidrelétrico, e independem da destinação da energia a ser gerada pelo potencial (autoprodução, produção independente ou serviço público). Estas diretrizes são flexíveis e podem ser adaptadas em função das caraterísticas do empreendimento.

Há vários documentos que regem a questão relativa aos aproveitamentos e, dentre eles, destacam-se:

- Constituição da República Federativa do Brasil: “Art 153 - O aproveitamento dos recursos minerais e de energia hidráulica depende de autorização ou concessão federal na forma da lei.”;
- Código de Águas;
- Decreto nº 24.643 de 10 de julho de 1934;
- Lei nº 8.987 de 13 de fevereiro de 1995: “dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previstos no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências.”;
- Lei nº 9.427 de 26 de dezembro de 1996: “institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências.”

De forma geral, o Projeto Básico pode ser tratado considerando a potência instalada e a dimensão do reservatório:

Centrais Geradoras Hidrelétricas (potência nominal até 1 MW)
Para projeto deste tipo de empreendimento é necessária apenas a comunicação à ANEEL para fins de registro estatístico.

Pequenas Centrais Hidrelétricas (potência nominal entre 1,1 até 30 MW e área do reservatório inferior a 3 km²)
Este tipo de empreendimento deve atender às diretrizes para estudos de pequenas centrais hidrelétricas. O Projeto Básico é a premissa para autorização de exploração do aproveitamento hidrelétrico. Sua aprovação e autorização para início da construção serão concedidas após a apresentação da LI.

Usina Hidrelétrica (potência nominal superior a 30MW)
O Projeto Básico deverá ser submetido à aprovação da ANEEL. A aprovação do Projeto Básico e a autorização para início da construção serão concedidas após a apresentação da LI.

Este terceiro tipo de aproveitamento é o alvo deste trabalho. Neste empreendimento, o Projeto Básico é a condicionante estabelecida no processo licitatório e de atendimento à exigência para início da construção do aproveitamento hidrelétrico.

Adicionalmente, aproveitamentos hidrelétricos devem ser submetidos a um processo de licenciamento ambiental visando evitar a degradação ao ecossistema. Os principais textos legais que orientam quanto ao licenciamento ambiental são as Resoluções do CONAMA no 237/97, a Política Nacional de Meio Ambiente (Lei n.º 6.931/81), a Lei de Crimes Ambientais, o Decreto n.º 99.274/90 e outras legislações estaduais e municipais.

5.4 Investigação dos Critérios Gerais do Projeto Básico

Das fases do projeto de usinas hidrelétricas, a do Projeto Básico é a de maior interesse nesta dissertação. Desta forma, faz-se necessário relembrar de forma sucinta as diretrizes para execução de projetos de usinas hidrelétricas.

Na vasta pesquisa realizada na documentação que aborda o assunto, foram estudadas as diretrizes sob a ótica dos testes de recomposição. Algumas delas se destacam e, neste item, são tratadas e comentadas as seguintes referências básicas: [ELETROBRAS, 1999], [ANEEL, 1998] e [CEPEL, 2007].

As diretrizes de projeto são relevantes na medida em que as estruturas, destinadas a usinas hidrelétricas, operam em condições críticas e variáveis, as quais podem acarretar situações danosas ao empreendimento, aos envolvidos e às populações adjacentes à usina. Visando evitar tais situações de impacto, os critérios de projeto estabelecem condições que devem ser atendidas na elaboração do Projeto Básico.

Estas condições são estabelecidas a partir das etapas anteriores de projeto e definem diretrizes para estruturas civis e eletromecânicas. Nestas diretrizes, são aplicados padrões de confiabilidade, segurança, economia, práticas de engenharia de projetos, normas técnicas, elaboração de desenhos e especificações e montagem de equipamentos [ELETROBRAS, 1999].

Quanto aos projetos civis e hidráulicos, os trabalhos investigados recomendam o atendimento a normas aceitas internacionalmente ou as desenvolvidas pelo setor elétrico brasileiro. Estes estudos definem os requisitos de níveis de água, dados do reservatório, dados de desvio e fechamento do rio, barragens, diques, chaminé de equilíbrio, canal de fuga, órgãos extravasores e circuito hidráulico de geração, dentre outros [CEPEL, 2007].

Com enfoque nas diretrizes para projetos eletromecânicos, foram consultados vários trabalhos e, dentre eles, cita-se o documento *Diretrizes para Elaboração de Projeto Básico de Usinas Hidrelétricas* [ELETROBRAS, 1999]. Este recomenda que sejam estabelecidos os requisitos de segurança, e o grau de automação previsto para a operação da usina, o qual condicionará os projetos e os níveis de monitoramento e supervisão dos equipamentos e dos sistemas auxiliares. Adicionalmente, para a segurança da usina, recomenda-se a fixação de coeficientes de segurança e níveis de proteção, bem como a utilização de tecnologias aprovadas na fabricação e na montagem dos equipamentos.

Estes conceitos fundamentais, que definem as características técnicas dos equipamentos eletromecânicos, terão efeito significativo sobre o custo global, o desempenho e a vida útil dos mesmos, e podem impactar significativamente a disponibilidade da usina que está diretamente relacionada ao seu desempenho.

Quanto às questões de segurança, o projeto básico ainda recomenda que sejam previstos:

- **Suprimento confiável de energia elétrica de emergência:**
  Esta recomendação visa ao suprimento dos equipamentos essenciais à segurança das instalações (bombas de drenagem e esgotamento, comportas dos órgãos extravasores, iluminação de emergência e do sistema de telecomunicações) e ao suprimento de energia para partida de pelo menos uma unidade geradora.

Observa-se que esta recomendação não considera a necessidade de simulação das condições de perturbação que são objeto deste trabalho.

- **Comportas dos órgãos extravasores:**
  As comportas extravasoras deverão ser projetadas para entrar em operação em qualquer situação que o reservatório se encontrar.

- **Segurança do pessoal de operação:**
  Devem ser previstos dispositivos e equipamentos que visem à segurança de pessoas. Exemplos de equipamentos eletromecânicos a serem previstos são iluminação e ventilação adequada, sinalização de áreas internas, rota de evacuação, sistema de proteção contra incêndio, sistemas de proteção contra choques elétricos e acidentes em geral.

Em [ELETROBRAS, 1999], existem algumas diretrizes que podem impactar a realização dos testes de recomposição, as quais estão mais relacionadas com o serviço auxiliar CA e CC. São elas:

“Os serviços auxiliares elétricos devem ter duas fontes normais e independentes de alimentação e uma de emergência para os serviços e sistemas vitais da usina.”

“Analisar a necessidade de uma fonte de energia externa (ou de emergência) para partida de uma unidade em caso de falta geral dos serviços auxiliares elétricos da usina.”

"Deverão ser definidos de modo mais amplo os aspectos relativos aos serviços auxiliares da casa de máquinas. Tratando-se de sistemas integrados, essas definições deverão abranger as demais estruturas da usina: vertedouro, tomada d'água e subestação."

"Definição do sistema de geração de emergência, incluindo filosofias de operação e controle, além da tabela preliminar de carga."

"Memórias de pré-dimensionamento dos equipamentos principais dos serviços auxiliares."

"Descrição básica dos equipamentos principais dos serviços auxiliares, como transformadores, equipamentos de manobra, quadros de distribuição, carregadores de baterias, baterias e outros."

O estudo realizado nesta dissertação, sobre as diretrizes apontadas no trabalho [ELETROBRAS, 1999], leva a algumas conclusões:

Pode-se verificar que as diretrizes se apresentam genéricas, subjetivas e não apontam especificamente para a necessidade de realização dos testes reais de recomposição. Para embasar esta afirmação, algumas destas diretrizes são apresentadas integralmente no Apêndice A.

Desta forma, para o agente de geração, pode-se tornar impossível a simulação das condições de perturbação, se esta necessidade não for considerada já na fase de projeto.

Cabe ressaltar que as diretrizes para projetos apontam a necessidade de boa disponibilidade dos equipamentos durante a fase de operação e este é um dos requisitos para aprovação dos testes de recomposição.

O documento relativo à Resolução ANEEL N.º 395 [ANEEL, 1998], também investigado, estabelece procedimentos para registro e aprovação de Estudos de Viabilidade e Projeto Básico. Esta resolução fornece diretrizes relacionadas a questões burocráticas de tramitação de documentos, informações a serem fornecidas aos órgãos responsáveis e requisitos a serem cumpridos. Esta resolução aborda critério tanto para Centrais Hidrelétricas quanto para Grandes Centrais Hidrelétricas.

Observa-se que este documento não expõe questões de ordem técnica quanto aos equipamentos eletromecânicos. Desta forma, não são verificadas diretrizes quanto à necessidade de simulação das condições de perturbação. Sendo possível a simulação de tais condições, torna-se viável a realização dos testes.

O anexo III da resolução Nº 421/10 [ANEEL, 2010] corresponde a uma lista que deve ser verificada para aceite, pela ANEEL, do Projeto Básico. Este *check-list* contém itens de cunho legal, desenhos, mapas e correlação entre o verificado no Projeto Básico e o intencionado no Inventário Hidrelétrico.

Similarmente à Resolução ANEEL Nº 395, este documento não aborda diretrizes que permitam a simulação das condições de perturbação.

O Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas [CEPEL, 2007] é um material vasto e aborda muitas questões socioambientais, energéticas, hidrológicas e de estudos gerais necessários.

Similarmente aos demais documentos já citados, o Manual de Inventário de Bacias Hidrográficas não considera uma provável classificação da usina para realização de testes.

A partir da análise das diretrizes nos diversos documentos pode-se concluir que pouco ou nada é verificado quanto à possibilidade de simular condições de perturbação. Tal fato pode tornar impossível a realização destes, pela falta de condição de simular perturbações. Esta constatação reforça a relevância desta pesquisa de mestrado.

5.5 Requisitos Técnicos para Conexão de Usinas Hidrelétricas na Rede Básica Segundo Procedimentos de Rede do ONS

Cumpridas as etapas de projeto, as usinas podem ser conectadas ao SIN, desde que cumpram os critérios de operação, previstos no documento Procedimentos de Rede do ONS [ONS, 2010].

Tal documento determina que os acessos de usinas atendam aos indicadores de desempenho da rede básica definidos pelo ONS. Nesta etapa de interligação, tornam-se mais explícitas as diretrizes relativas ao processo de recomposição. É determinante que as usinas não reduzam a flexibilidade de recomposição da rede elétrica, seja em função de limitações dos seus equipamentos, seja em função do tempo de recomposição. Adicionalmente, a responsabilidade quanto à influência que o gerador terá no SIN, ou nas suas instalações, é do acessante.

O procedimento determina, especificamente para o ponto de conexão e para a área de influência, que devem ocorrer verificações quanto:

> "Ao nível de curto-circuito com a presença da central geradora;
> À capacidade de disjuntores, barramentos, transformadores de corrente e malhas de terra;
> À adequação dos sistemas de proteção envolvidos com a integração do gerador;
> À avaliação paramétrica dos reguladores de tensão, de velocidade e dos sinais estabilizadores." [ONS, 2010]

Verifica-se, também, que este documento, [ONS, 2010], mais próximo à fase de operação, não contém diretriz que possibilite simular condições de perturbação. Tal fato pode tornar impossível a realização destes ratificando a importância desta pesquisa de mestrado.

5.6 Considerações Finais

Do exposto neste capítulo, verifica-se que as diretrizes relativas aos projetos de usinas hidrelétricas são genéricas e abordam questões quanto à segurança e requisitos mínimos para operação destas usinas. O estudo realizado sobre as diretrizes vigentes permitiu que fossem observadas questões relevantes relacionadas às etapas de projeto e de interligação ao SIN.

Na Etapa de Projeto, nota-se que as diretrizes para a recomposição, após uma perturbação real, e para a simulação das condições de teste são efetivamente ausentes. Na Etapa de Interligação, o ONS, por meio dos Procedimentos de Rede, sinaliza algumas diretrizes quanto ao desempenho da usina durante o processo de recomposição. Entretanto, similarmente à Etapa de Projeto, não fazem exigência quanto à condição de realização de testes das novas usinas.

Para que os testes sejam realizados com sucesso, tais questões precisam ser tratadas, visando à minimização das fragilidades do processo. Esta dissertação objetiva contribuir nesta direção, com foco na Etapa de Projeto, sob a forma de uma proposta de procedimentos que contemplem a necessidade de realização dos testes. Esta proposta é apresentada no capítulo seguinte, por meio de uma ferramenta computacional, denominada SIAPE.

6 SIAPE - PROPOSTA APLICADA A PROJETOS DE USINAS DE AUTORRESTABELECIMENTO

6.1 Considerações Iniciais

O presente capítulo propõe a especificação da ferramenta computacional SIAPE, aplicada às áreas de projeto de usinas hidrelétricas, visando inserir, já nesta etapa, meios para a simulação das condições de perturbação e, consequentemente, a realização dos testes reais de recomposição.

A especificação proposta é fruto da integração de experiências práticas e acadêmicas. Ela se baseia nos estudos registrados nos capítulos anteriores e na experiência da autora desta dissertação na área de operação de sistemas de potência, em especial no controle restaurativo.

A rotina operacional mostrada no Capítulo 4 se apresenta genérica, cabendo aos agentes elaborar estratégias e implementar melhorias, para superar inúmeros desafios e alcançar o propósito de executar e aprovar os testes.

Alguns destes desafios são oriundos de usinas hidrelétricas projetadas sem a devida preocupação com a necessidade futura de realização de testes. Soma-se a esses desafios, o fato de que não consta, na literatura sobre projeto de usinas hidrelétricas, diretriz específica para que tais projetos contemplem a possibilidade de simulação das condições de perturbação. Adicionalmente, esta classificação é dinâmica e uma usina que atualmente não é classificada pelo ONS para realizar teste de recomposição, pode vir a ser reclassificada para realizar testes integrais ou parciais e vice-versa, em função de estudos elétricos do ONS e desempenho das usinas, conforme apresentado no Capítulo 5. Observa-se, mais uma vez, que a realização dos testes não é tarefa trivial, pois sua finalidade é verificar a adequada inter-relação dos equipamentos da usina. Esta inter-relação é identificada no Capítulo 3.

Adicionalmente, verifica-se que, nos últimos anos, tem ocorrido o amadurecimento de certas áreas do sistema elétrico. Destacam-se os processos de automação e procedimentos de segurança elétrica. Ações que eram absolutamente manuais passaram a ser automatizadas. Constituem exemplos de tal amadurecimento os circuitos de alívio de carga, circuitos de exercício do GMG, Esquemas Regionais de Alívio de Carga, comandos automáticos de conversão, reversão, parada e partida de unidades geradoras. Esta nova situação merece ser considerada.

Do exposto, conclui-se pela importância de se considerar a possibilidade de execução dos testes já na etapa de projeto da usina, com o objetivo de adequá-la a esta futura necessidade. Nesta direção, é proposta a ferramenta SIAPE, de forma a automatizar as ações para simulação das condições de perturbação. Tendo como base a experiência prática e acadêmica dos autores, os itens seguintes apresentam uma proposta de especificação de sistemas e circuitos para usinas hidrelétricas que favoreçam a simulação das condições de contorno dos testes reais de recomposição. O propósito é o de estreitar a lacuna existente entre a fase de projeto e a fase de operação, quanto à demanda de realização deste tipo de teste. Observa-se ainda que as técnicas apresentadas também podem ser utilizadas para adaptar as usinas já existentes.

Este trabalho se constitui numa realimentação para a fase de projetos de usinas hidrelétricas de forma a apontar as necessidades verificadas durante a fase de operação. Neste contexto, conhecidos os requisitos atuais para aprovação e realização dos testes reais de recomposição, e investigados alguns dos principais desafios transpostos pelos agentes, é possível propor melhorias às plantas de geração visando à sua execução.

6.2 Especificações para Projeto de Usinas Hidrelétricas Visando à Simulação das Condições de Perturbação para Realização dos Testes de Recomposição

Este item apresenta as especificações para sistemas e circuitos que possibilitem a execução dos testes para que, no item seguinte, seja abordada a filosofia do SIAPE. O trabalho aponta para pontos relevantes que devem ser observados durante a fase de projeto de usinas.

Conforme visto no Capítulo 4, a rotina para realização dos testes reais de recomposição contempla, para os testes parciais, a verificação da estabilidade da unidade geradora girando a vazio e excitada. No teste parcial individual, no qual as unidades geradoras são mantidas girando a vazio, tal procedimento testa, basicamente, o funcionamento das cargas essenciais que devem permanecer ligadas suprindo as demandas essenciais das unidades geradoras, tais como óleo e água para refrigeração, compressores de estabilização, comandos de válvulas.

Todas as questões já avaliadas durante o teste parcial individual também são verificadas durante o teste parcial simultâneo. A diferença é que são verificadas as operações simultâneas das unidades geradoras. Tal necessidade verifica-se, por exemplo, no compartilhamento de sistemas por duas ou mais unidades geradoras.

As UGs que realizam testes parciais são aquelas que participam da fase coordenada de recomposição. Ou seja, é considerado que estas permanecerão

rodando a vazio e excitadas não necessitando receber energia para ligar suas unidades geradoras.

Os testes parciais, em relação aos integrais, são mais simples e, portanto, exigem menos adequações e formulação de estratégias para a sua execução. Desta forma, pode-se concluir equivocadamente que as usinas não necessitem de adequações para especificação de seus projetos. Este é um equívoco porque a classificação das usinas (parcial, integral ou sem autorrestabelecimento), conforme já enfatizado, é dinâmica e pode ser alterada em função das necessidades sistêmicas. Nesse contexto uma usina que realiza teste parcial pode passar a realizar teste integral ou vice-versa.

Proposta: Recomenda-se que as usinas estejam aptas a realizar tanto testes integrais quanto parciais.

Observa-se que algumas usinas de autorrestabelecimento parcial possuem até GMG capaz de suprir cargas essenciais de pelo menos uma unidade geradora, mesmo não sendo necessária a sua utilização, pois estas são regulamentadas para participarem da fase coordenada e, necessariamente, permanecerem girando a vazio e excitadas durante uma perturbação real. Entretanto, algumas usinas que realizam testes parciais não possuem GMG, cabendo ao agente, em caso de alteração da classificação da usina, a instalação do recurso de autorrestabelecimento e de toda a consequente adaptação de seus serviços auxiliares.

As unidades geradoras que realizam testes integrais são aquelas que participam da fase fluente de recomposição. Ou seja, estas usinas suprem as cargas essenciais de suas unidades geradoras e, portanto, sem a necessidade de aguardar recebimento de energia para ligá-las.

A rotina para testes reais de recomposição permite que as condições de simulação de perturbação total ocorram de forma manual, ou seja, o operador do agente pode manobrar diversos circuitos manualmente, inclusive realizar comutações do serviço auxiliar.

Como apresentado no capítulo 3, o serviço auxiliar de uma usina é um sistema complexo que, ao ser manobrado manualmente, acarreta muitas manobras que podem provocar erros e, consequentemente, reprovação dos testes e, até mesmo, falhas durante uma perturbação real. Entretanto, algumas usinas têm o seu serviço auxiliar capaz de comutar fontes automaticamente. Desta forma é interessante que a usina tenha todas as suas unidades geradoras paradas proporcionando comutações entre fontes e suprimento de cargas de forma automática, sem intervenção humana. Estas ações são relevantes porque evitam erros humanos e testam a plena disponibilidade dos vários componentes do serviço auxiliar CA. Cabe ressaltar que ainda há usinas no SIN que possuem comutação do serviço auxiliar apenas de forma manual.

Proposta: Recomenda-se que os serviços auxiliares de usinas hidrelétricas sejam projetados de forma que suas fontes comutem entre si automaticamente evitando erros de manobras durante os testes e proporcionando maior facilidade na realização dos mesmos.

Ainda quanto ao serviço auxiliar CA, é interessante mesclar, durante a realização do teste simultâneo, unidades geradoras que possuem derivação para o serviço auxiliar com unidades geradoras que *não* possuem derivação para o serviço auxiliar. Estas unidades geradoras devem ser ligadas simultaneamente a uma barra desenergizada.

Proposta: Nesse contexto, recomenda-se que devem ser previstas condições de ligação na barra desenergizada de unidades geradoras que possuem derivação para o serviço auxiliar, simultaneamente a unidades geradoras que não a possuem.

Uma usina, cuja comutação entre fontes de energia para o serviço auxiliar ocorre automaticamente, tem como premissa que a parada de todas as UGs leva à comutação entre as fontes e, consequentemente, proporciona tal suprimento, mesmo estando todas as unidades desligadas. Durante a realização do teste, a parada de todas as UGs da usina proporciona a verificação do pleno funcionamento dos dispositivos do serviço auxiliar, bem como suas comutações. Tal fato acarreta o suprimento das cargas essenciais pelo recurso de autorrestabelecimento que pode ser um GMG.

Alguns GMGs têm capacidade de suprir apenas as cargas essenciais de uma UG. Obviamente, quando tal sistema funciona, esta primeira unidade geradora poderá suprir todas as demais cargas, mas seria interessante haver um GMG com maior capacidade que pudesse suprir o maior número de unidades geradoras possível.

Proposta: Recomenda-se que os recursos de autorrestabelecimento de usinas hidrelétricas sejam capazes de suprir a carga essencial de mais de uma unidade geradora, proporcionando maior confiabilidade e dinamicidade aos testes e à recomposição numa perturbação real.

Adicionalmente, observa-se que, visando proporcionar a redução da capacidade do GMG e, consequentemente, seu custo, é implementado o circuito de alívio de carga em algumas usinas. Este circuito tem o propósito de desligar automaticamente as cargas não essenciais, fazendo o GMG suprir apenas as cargas essenciais da UG. Entretanto, em algumas usinas, este esquema não é implementado, e as cargas não essenciais devem ser desligadas manualmente. Tais manobras podem implicar erros, tais como o desligamento de cargas essenciais para o restabelecimento da UG.

Proposta: Recomenda-se que os projetos de usinas hidrelétricas considerem a ativação e a desativação do sistema de alívio de cargas não essenciais automaticamente.

Para recomposição da unidade geradora com vistas à realização dos testes, é necessário que o disjuntor de excitação inicial do GMG esteja desligado. A finalidade desta ação é comprovar que a magnetização do campo do GMG seja proveniente do seu próprio banco de baterias, ou recurso autônomo, que não seja a fonte CA retificada para CC. Atualmente, muitos destes disjuntores são desligados manualmente e é requerido que sejam novamente religados após a conclusão do teste.

Proposta: Recomenda-se que os projetos contemplem as fontes para suprimento do campo inicial do GMG ligadas ou desligadas automaticamente.

O desligamento de todas as UGs não é uma tarefa trivial e exige estudos elétricos e simulações, principalmente com relação às condições para mitigar riscos ambientais e efetuar o controle de tensão. Tais verificações são justificadas porque muitas usinas são relevantes para o controle de tensão em sua região, em função da potência reativa que podem fornecer ou absorver. Tal condição é piorada pela necessidade de o teste ocorrer em carga leve o que aumenta a importância de operação destas usinas atuando na redução dos níveis de tensão. Desta forma, parar todas as UGs de uma usina exige disponibilidade de recursos para controle de tensão. Entretanto, estes recursos nem sempre estão disponíveis e, assim, a premissa de parar todas as unidades deve ser avaliada com critério, apesar de ser altamente recomendável, pelos benefícios agregados.

A condição de parada de todas as unidades de uma UH também impacta aspectos ambientais e sociais, pela necessidade de se manter a navegabilidade e a vazão mínima natural do rio. Esta situação exige a abertura de comportas do vertedouro ou extravasoras. O vertimento pode não ser possível, caso o nível do reservatório esteja abaixo do nível mínimo de vertimento.

Outro impacto ocorre nas estruturas civis do vertedouro, pois vertimentos abaixo do mínimo as comprometem, acarretando atividades de manutenção posteriores em função de danos, tais como o carregamento de material pela água.

Portanto, parar todas as unidades geradoras é uma ótima condição de avaliação dos equipamentos, mas todas as variáveis envolvidas devem ser analisadas.

Verifica-se, assim, que o processo de tomada de decisão é bastante complexo, sendo necessário investigar um conjunto significativo de variáveis. Para evitar erros humanos, dificuldades e reprovação dos testes, recomenda-se que tal processo seja realizado automaticamente. Neste contexto, esta dissertação propõe a ferramenta computacional SIAPE.

Proposta: Recomenda-se que sejam projetadas ferramentas computacionais que identifiquem as variáveis a serem observadas como pré-condições para realização de um teste. Esta dissertação propõe a aplicação do SIAPE.

Conforme verificado no Capítulo 3, as comportas da tomada d'água também têm a finalidade de proteger a UG contra subfrequências que poderiam levar à sobrevelocidades danosas à UG. Normalmente, estas comportas devem primeiramente ser pouco abertas, para equalização do nível de água entre o conduto forçado e a caixa espiral. Posteriormente, devem ser abertas completamente, sendo esta uma pré-condição de partida da unidade geradora. Além disso, o sistema de abertura das comportas tem necessidade de suprimento de energia.

Verifica-se que, para os testes simultâneos, a preocupação relativa à plena capacidade de abertura das comportas também ocorre. Isto porque, para estas usinas, poderá ocorrer o fechamento de uma ou mais comportas, sendo necessária a abertura destas, e o suprimento de energia para os dispositivos de abertura.

Desta forma, é interessante verificar as comutações para suprimento de energia às comportas da tomada d'água, bem como iniciar o teste com a comporta da tomada d'água fechada. Porém, esta não é uma diretriz da rotina para execução dos testes.

Algumas instalações possuem bombas manuais para abertura das comportas da tomada d'água que, de forma alternativa ao suprimento elétrico, poderiam ser testadas.

Algumas usinas têm tomadas de água para suprimento de serviços essenciais da unidade geradora coletados do conduto forçado. Um exemplo deste serviço é o sistema de vedação deslizante que deve estar em operação mesmo que a UG esteja desligada. O fechamento da comporta pode levar a baixo nível de água do conduto, o que acarreta indisponibilidade de serviços, como água para o sistema de refrigeração, para o funcionamento de ejetores, dentre outros.

Desse ponto de vista, o fechamento da comporta da tomada d'água tem sentido durante a realização do teste simultâneo, em função dos equipamentos comuns a duas ou mais unidades geradoras. Apesar da sua relevância, esta ação de fechamento da comporta não é contemplada no circuito proposto, porque não é uma exigência da rotina. Entretanto, é perfeitamente possível que tal exigência seja acrescentada ao SIAPE.

O fechamento das comportas da tomada d'água pode ser implementado no SIAPE, para que sejam verificados o funcionamento dos mecanismos de abertura e a autonomia do suprimento de água para os diversos serviços de água industrial.

Para os testes integrais individuais, há a necessidade de parada com acionamento do sistema de frenagem e rotação nula das unidades geradoras. Se as UGs forem projetadas com alta rotação nominal, precisarão de maior tempo para parar, podendo comprometer o tempo de realização do teste, levando à sua reprovação.

Proposta: Recomenda-se que o tempo de frenagem das unidades geradoras ou sua rotação sejam reduzidos, tanto quanto possível, para que o tempo de realização do teste não seja comprometido.

A configuração e a disposição dos barramentos da subestação da usina têm muita influência na realização do teste. Tais impactos relacionam-se a questões, tais como o suprimento de consumidores ligados radialmente, barramentos do tipo barra principal e transferência sem possibilidade de seccionamento, e barramentos com equipamentos ligados diretamente à barra de simulação dos testes (equipamentos estes que podem ter sua vida útil reduzida com surtos de tensão provocados pela realização dos testes).

Verifica-se que, em alguns projetos de usinas, há consumidores ligados radialmente à UH e, consequentemente, dependem exclusivamente desta usina para suprimento de suas cargas. A realização de testes nestas usinas pode resultar em desligamento dos consumidores. Observa-se que, em função de vigência dos índices de fiscalização da ANEEL, é cada vez mais prejudicial para as empresas indisponibilizar o suprimento de energia para os clientes, sendo necessário, durante os testes, manter fonte de energia para consumidores em operação normalmente. A figura 6.1 apresenta um diagrama de uma subestação com os clientes A, B e C supridos exclusivamente pela usina.

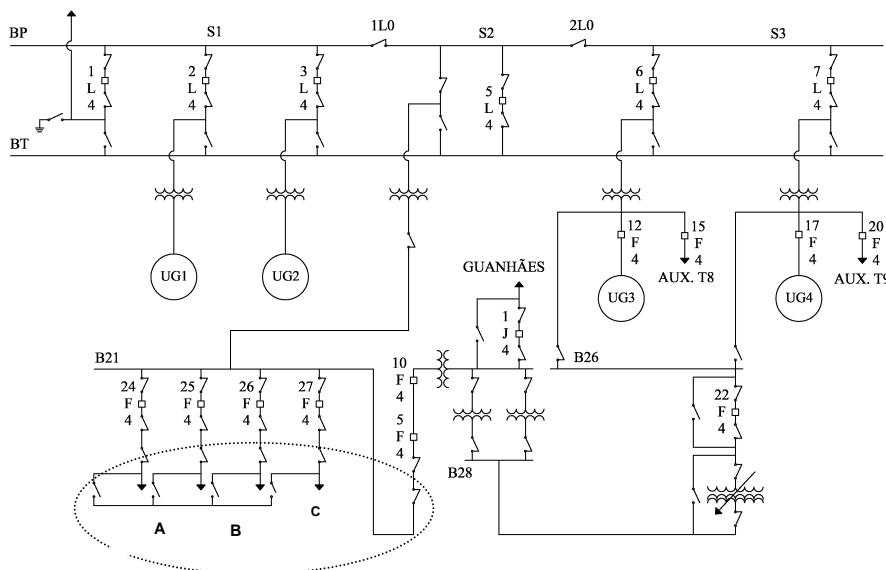



Figura 6.1 - Estação com suprimento dos consumidores (indicados em linha tracejada) exclusivo pela usina.

Proposta: Recomenda-se que não haja consumidores supridos radialmente via usina hidrelétrica, para que sejam evitados desligamentos durante a realização do teste ou mesmo que a sua realização fique impossibilitada.

Com a necessidade de se ligarem as UGs em barra desenergizada, durante o teste integral simultâneo, a configuração do barramento é relevante e pode impactar significativamente a realização dos testes. Bom exemplo a esse respeito é o indicado na figura 6.2, no qual verifica-se que os transformadores T6 e T7 estão ligados diretamente aos barramentos B1 e B2. Nesta configuração, o transformador poderá estar sujeito a danos, devido a oscilações, quando as unidades geradoras forem ligadas a vazio na barra desenergizada. Desta forma, para que tal risco seja evitado, é importante e necessário que o transformador T6 (figura 6.2) seja isolado, com a abertura da chave 1UT6, implicando mais manobras para execução do teste.

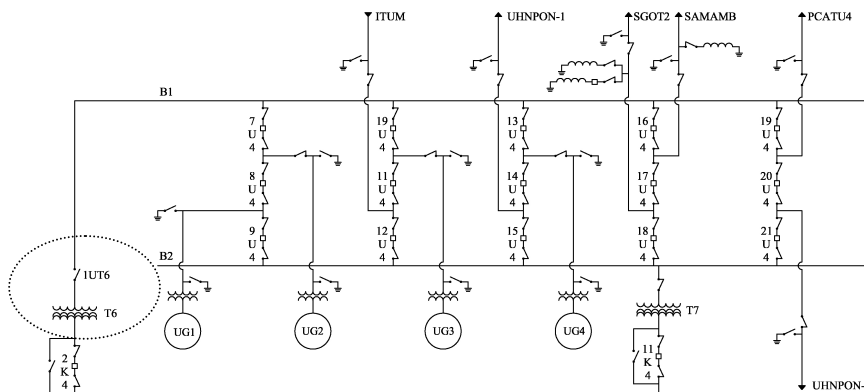



Figura 6.2 - Estação com autotransformador ligado diretamente à barra.

Proposta: Recomenda-se que os barramentos de usinas não contenham equipamentos ligados diretamente à extremidade dos barramentos nos quais as unidades geradoras serão ligadas.

Na figura 6.3 há outro exemplo de barramento que não contribui para a realização dos testes reais de recomposição. Nesta estação a configuração do barramento é do tipo barra principal e transferência, cuja barra principal é seccionável. Portanto, se for necessário manter alguma UG em operação para controle de tensão na região, é possível manter uma barra desenergizada para realização do teste integral através do seccionamento da barra. Entretanto, informação relevante é a localização do TP (transformador de potencial) de sincronismo para ligar esta(s) UG(s) para controle de tensão. Se for necessário ligar as UGs 5 e 6, e o TP de sincronismo estiver localizado na seção S1, estando a chave indicada na figura aberta, não será possível o sincronismo destas unidades, podendo comprometer a realização do teste.

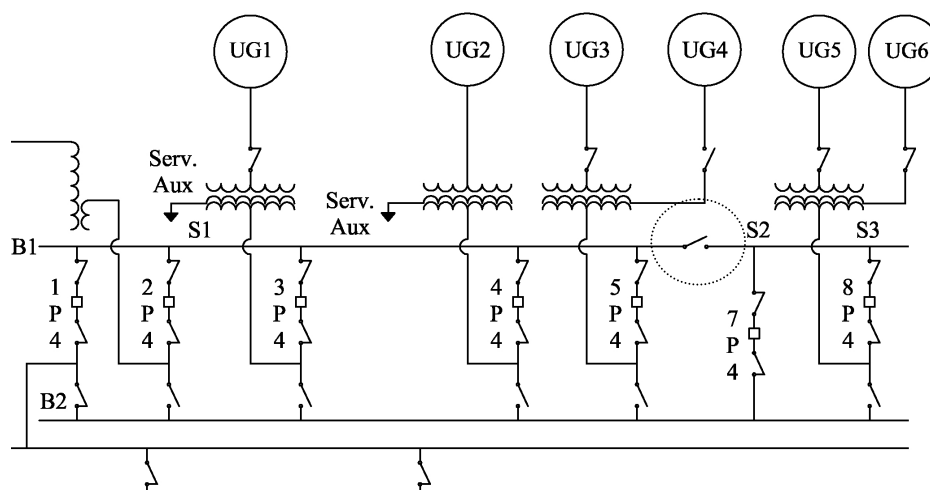



Figura 6.3 - Estação com barra principal seccionável.

Situação similar à anterior, mas piorada, é o barramento que não permite seccionamento, implicando necessariamente desligamento dos equipamentos ligados no barramento.

Proposta: Recomenda-se que barramentos do tipo barra principal e transferência sejam seccionáveis para dinamizar a ligação de unidades geradoras nas seções desenergizadas. Adicionalmente, é necessário que a referência de tensão para os relés de sincronismo estejam disponíveis nestas seções de barra.

Unidades geradoras geminadas, como as mostradas na figura 6.4, também são críticas para a simulação das condições de contorno para realização dos testes, pois implicam muitas paradas e partidas, visto que a unidade geradora a ser testada deve iniciar o teste conectada ao SIN.

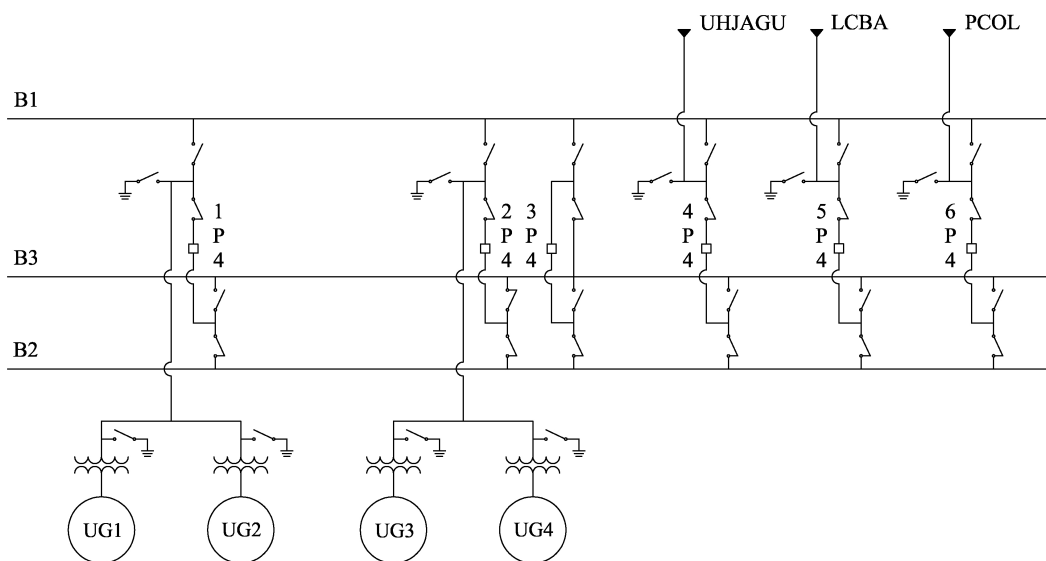



Figura 6.4 - Estação com unidades geradoras geminadas.

Proposta: Dado o alto número de paradas e partidas que a realização dos testes provoca em unidades geradoras geminadas, é recomendável que este tipo de configuração não ocorra.

Nesse contexto é interessante que haja barramento desenergizado e disponível para realização dos testes. Uma configuração exemplo e que se adequa é a mostrada na figura 6.5 denominada disjuntor e meio.

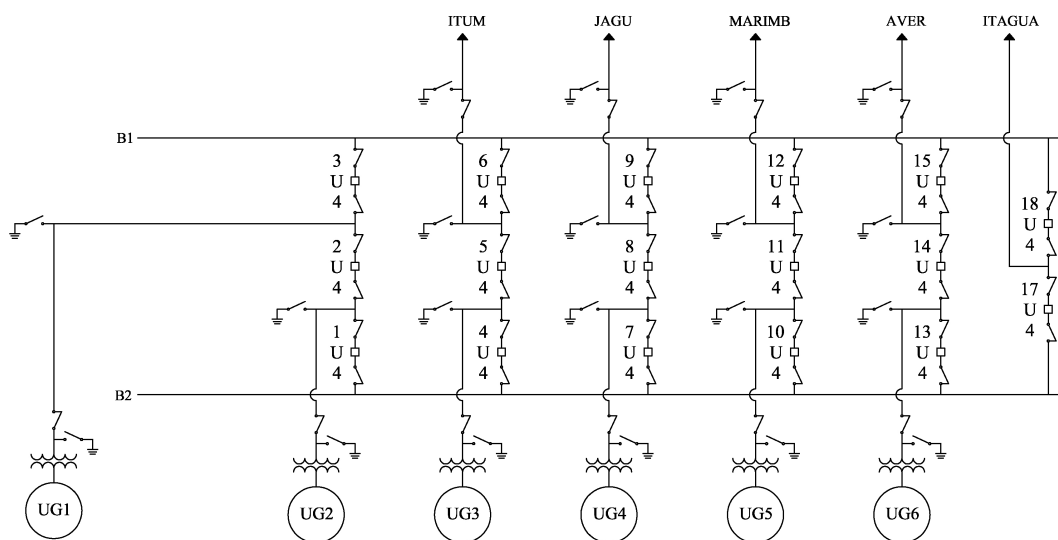



Figura 6.5 - Estação com subestação na configuração disjuntor e meio.

Pode-se observar que a condição de blecaute é crítica. Mas, desafio maior constitui a simulação destas condições para realização do teste, tendo em vista a variedade de projetos existentes. Observa-se que estas dificuldades não são em relação à recomposição durante uma perturbação real, mas sim de simular as condições de perturbação de acordo com a rotina RO-RR.BR.01, mantendo os demais equipamentos em operação normal e segura.

Observa-se que as estratégias adotadas para simulação das condições de perturbação se tornam muito dependentes de intervenção humana. Nesse contexto os envolvidos devem verificar as variáveis pertinentes, a fim de evitar o dano da reprovação dos testes pelo descumprimento da rotina, manobras indevidas, desligamentos de outros sistemas, danos ambientais e às populações ribeirinhas.

É relevante que todos estes cuidados estejam embutidos em uma ferramenta que tenha a capacidade de operar toda a simulação das condições de perturbação observando os pontos levantados.

Para cumprir este propósito, esta dissertação propõe o SIAPE, ferramenta apresentada a seguir, partindo do pressuposto de que o projeto da usina atende as propostas recomendadas, com vistas à necessidade de realização dos testes reais de recomposição.

6.3 *SIAPE* - Simulador Automático de Perturbação

A motivação principal da implementação do SIAPE é possibilitar que os projetos das novas usinas hidrelétricas, garantam que as UHs estejam aptas a simular as condições de perturbação, comprovando sua capacidade de restabelecimento.

É importante ressaltar que, apesar do objetivo inicial proposto para o SIAPE ter sido voltado para a etapa de projetos, esta ferramenta poderá ser aplicada na usina hidrelétrica na fase de operação. Adicionalmente, poderá ser acionada apenas para verificar as condições da usina e não, necessariamente, para realização dos testes de recomposição.

6.3.1 SIAPE - Visão Geral

O fluxograma mostrado na figura 6.6 indica os passos básicos do processo de decisão do SIAPE.

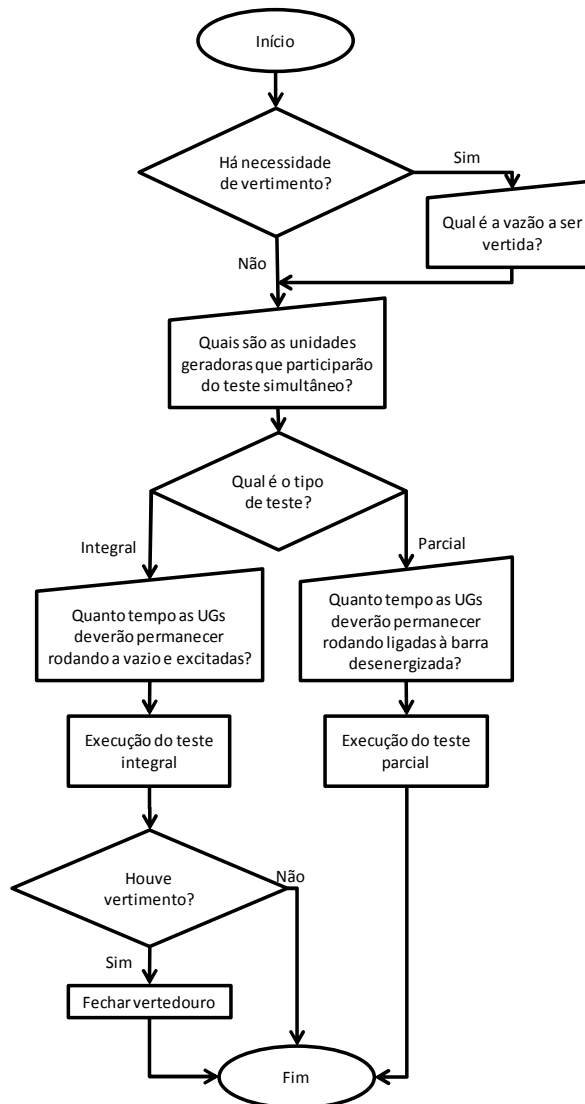



Figura 6.6 - Fluxograma representando o SIAPE de forma simplificada.

Ao ser acionada, a ferramenta requer que alguns parâmetros sejam inseridos. O SIAPE faz questionamentos ao usuário para que as condições iniciais sejam parametrizadas. Analisando o fluxograma, percebe-se que, basicamente, há três questões relacionadas a: vertimento, unidades geradoras e tipo de teste.

Sobre a necessidade de vertimento:
Este requisito é variável em função das condições do rio e de operação da usina e do SIN, sendo extremamente relevante. A finalidade de abertura do vertedouro é manter a vazão do rio para a ictiofauna local e para atendimento de necessidades da população ribeirinha durante a realização dos testes. Ao informar que o vertedouro será aberto, deverá ocorrer parametrização quanto ao valor a ser vertido.

Sobre as unidades envolvidas nos testes:
Informação importante a ser parametrizada diz respeito às unidades geradoras que passarão pelo teste simultâneo. Tanto no parcial quanto no integral na modalidade simultâneo, deve ser testado o número mínimo de UGs previsto na rotina de recomposição. Adicionalmente, são informadas quais unidades geradoras são consideradas.

Sobre o tipo de teste:

O usuário seleciona o tipo de teste que será executado: parcial ou integral. A seleção do teste consiste em ganho relevante agregado pelo SIAPE que considera o fato de a usina estar apta a realizar quaisquer dos testes. Este atributo torna o processo dinâmico visto que a reprovação de uma usina com determinada classificação pode ser, conforme já comentado, reclassificada ou ter sua atribuição para outra modalidade de teste.

Se o tipo de teste inserido for o parcial deverá ser informado quanto tempo as unidades geradoras deverão permanecer rodando a vazio e excitadas. Atualmente este período é de 30 minutos, mas dada a sua dinamicidade é interessante que este valor seja inserido pelo usuário.

Sendo o teste selecionado integral, deverá ser informado o tempo que as unidades geradoras permanecerão rodando a vazio simultaneamente na barra desenergizada. De forma similar ao teste parcial, este tempo para o teste integral também é dinâmico e atualmente encontra-se em 60 segundos.

Vale observar que algumas informações serão inseridas dependendo das escolhas iniciais. Por exemplo, se for indicado que não haverá vertimento, não é necessário informar a vazão vertida. Outro exemplo é se a intenção for executar um teste parcial, obviamente não será perguntado o tempo de giro a vazio na barra desenergizada.

A figura 6.7 apresenta uma proposta de tela inicial para o SIAPE. Ela contém as parametrizações indicadas no fluxograma simplificado da figura 6.5. Neste exemplo, foi considerada uma usina com seis unidades geradoras.

Figura 6.7 - Tela inicial do SIAPE contendo as parametrizações.

O SIAPE pode ser ampliado ou reduzido, com a inclusão de novas funcionalidades, com o propósito de tornar os testes mais críticos ou menos severos. Exemplo de implementação pode ser a parada da unidade geradora com fechamento da comporta da tomada d'água. Para tal, é necessário que as usinas estejam adaptadas às condicionantes dos testes conforme propostas apresentadas no item anterior.

Após a fase de parametrização inicial, tem início a etapa de detalhamento dos testes, relacionados aos blocos "Execução do Teste Parcial" e "Execução do Teste Integral", detalhada no próximo item.

6.3.2 SIAPE - Estratificação do Bloco Execução do Teste Parcial

O teste parcial deve ser realizado para que, numa perturbação real, a unidade geradora permaneça rodando a vazio e participe do processo de recomposição durante a fase coordenada. O giro a vazio de unidades geradoras é uma situação crítica, tanto mecanicamente quanto eletricamente. Isto mostra a importância deste tipo de teste.

O teste parcial consiste na “desinterligação” da UG, a permanência desta unidade girando a vazio por pelo menos 30 minutos e, posteriormente, a sua interligação ao SIN. Obviamente, antes do início do teste, a UG deve estar ligada ao SIN para que seja proporcionada a sua “desinterligação”.

A estratificação do bloco “Execução do Teste Parcial” (indicado na figura 6.6) é detalhada no fluxograma da figura 6.8. O processo tem início com o questionamento a respeito do estado inicial das unidades geradoras, e procede à interligação destas UGs, caso não estejam interligadas ao SIN. Esta ação se deve ao requisito contido na rotina. Esta fase corresponde aos passos “Condição Inicial” e “Interligar ao SIN as UGs que passarão pelo teste”.

O teste deve ser executado individualmente em cada uma das unidades geradoras que são habilitadas a fornecer energia para suprimento das cargas do serviço auxiliar. Sendo assim, há um *loop* no fluxograma mostrado na figura 6.8, para proporcionar a realização do teste individual em todas elas. Seu início é caracterizado pelo passo “Iniciar teste parcial individual”. A UG sob teste é indicada como UG *n*.

No próximo passo, procede-se ao comando de redução de geração, necessária para que o SIN não seja sensibilizado por um corte abrupto de geração, e a UG não precise rejeitar esta geração fechando rapidamente a circulação da água. Esta fase corresponde ao passo “Reduzir geração da UG *n*”.

Posteriormente, é realizada a desinterligação da UG *n*, por meio da abertura do disjuntor de interligação. É aguardado o período da UG *n* girando a vazio e excitada. Este período é indicado na parametrização inicial. Esta fase corresponde aos passos “Condição da UG *n*” e “Condição de Tempo”.

Terminado o período de giro a vazio, o teste é finalizado e a UG *n* pode ser interligada ao SIN. Esta fase corresponde aos passos “Interligar a UG *n* ao SIN”, “Fim do teste parcial individual da UG *n*”. Após a interligação da unidade, procede-se ao comando de elevação da sua geração. Esta fase corresponde ao passo “Elevar a geração da UG *n* que passou pelo teste parcial simultâneo”

Todo o processo descrito acima deve ser repetido para as demais UGs. Esta fase corresponde aos passos “Condição de Finalização” e “Selecionar a próxima UG *n*”. Quando o teste individual tiver sido realizado para a última unidade geradora, este é finalizado e o teste simultâneo poderá ter início.

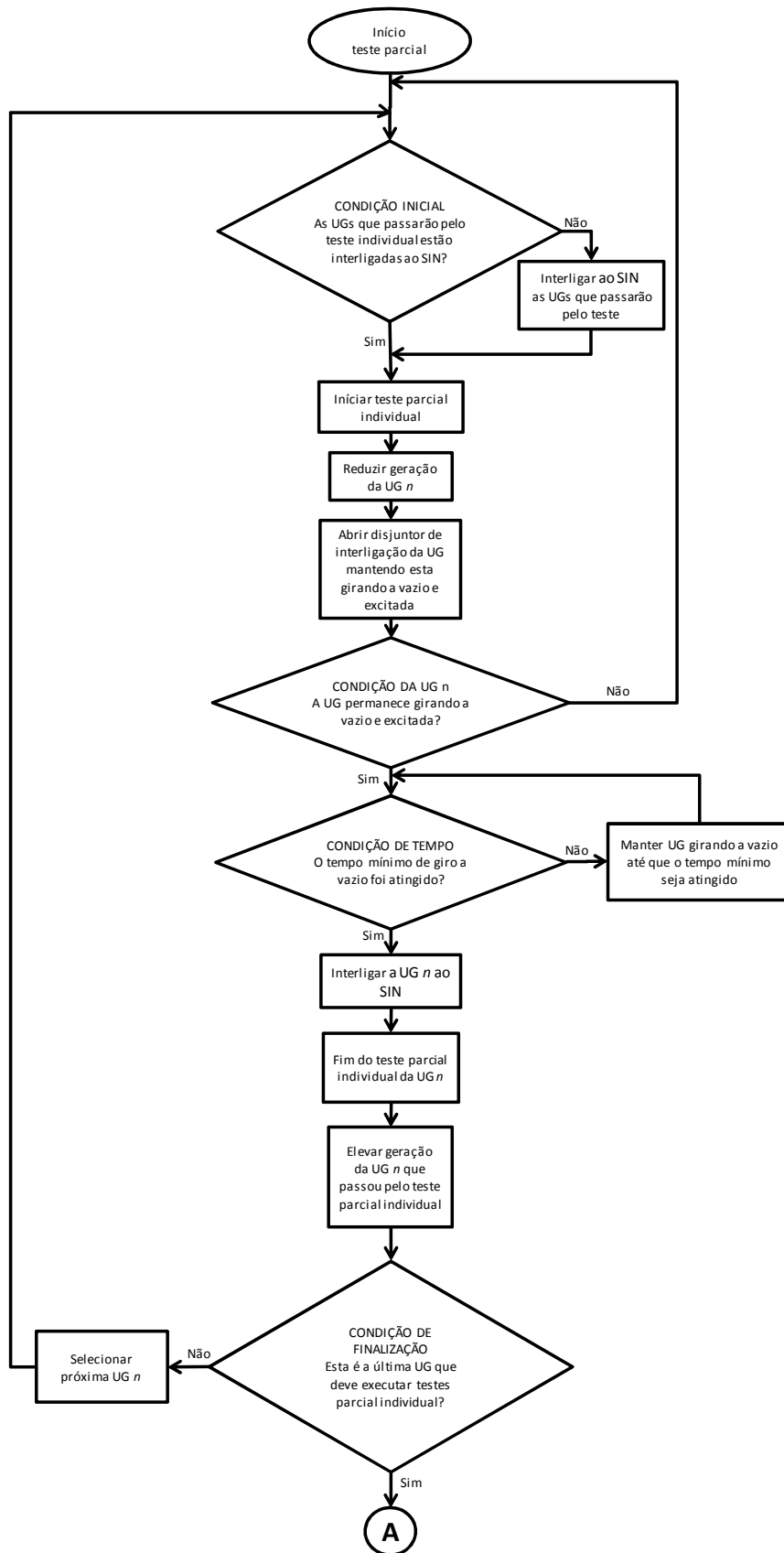



Figura 6.8 - Teste parcial individual estratificado.

O teste simultâneo é similar ao parcial, diferenciando-se deste último pelo fato de duas ou mais UGs permanecerem rodando a vazio e excitadas simultaneamente. Mesmo que a usina possua apenas uma UG com derivação para o serviço auxiliar, esta UH deverá executar o teste simultâneo com uma UG que não o possui. A estratificação do bloco "Execução do Teste Simultâneo" (indicado na figura 6.6) é detalhada no fluxograma da figura 6.9.

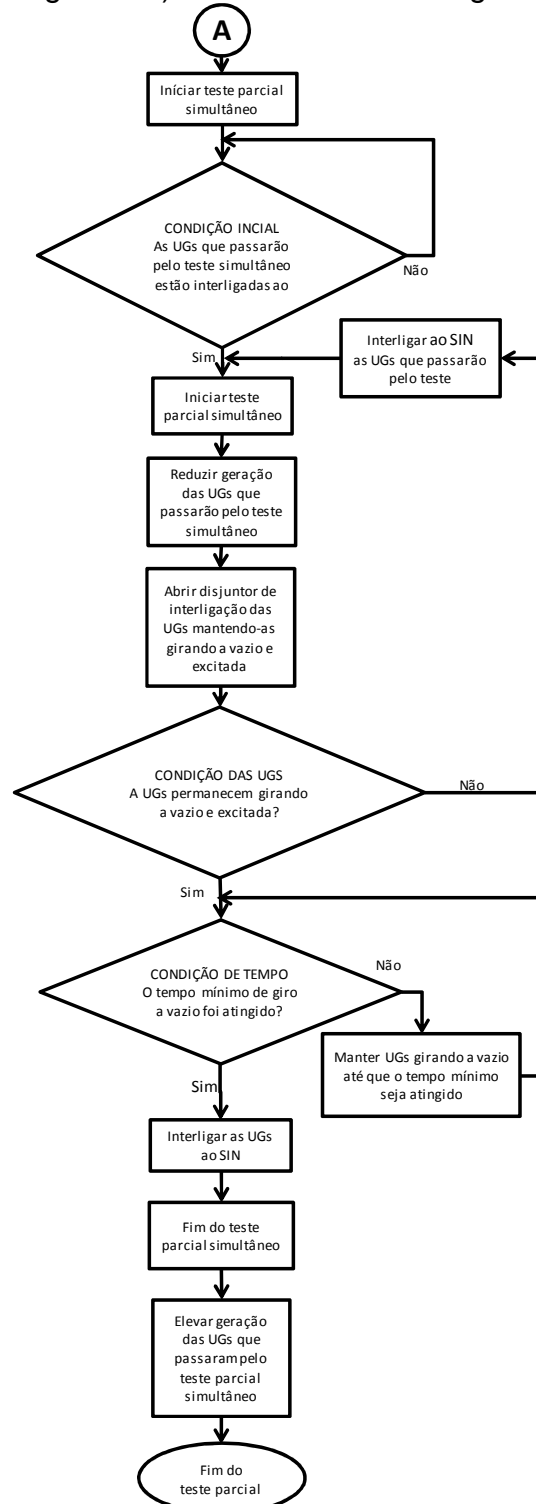



Figura 6.9 - Teste parcial simultâneo estratificado.

6.3.3 SIAPE - Estratificação do Bloco Execução do Teste Integral

O teste integral verifica se a usina possui a capacidade de sair da condição de ausência de energia e ser restabelecida, sem o auxílio de fonte de energia externa. Basicamente, as UGs são interligadas ao SIN, posteriormente desligadas e restabelecidas com recurso de autorrestabelecimento.

Os testes integrais são mais complexos que os parciais por exigirem que a UG pare, inclusive com aplicação do sistema de frenagem durante o individual, e esta UG deve ser ligada a uma barra desenergizada por um período determinado pela rotina. Similarmente ao parcial, devem ocorrer testes simultâneos ou individuais.

A estratificação do bloco "Execução do Teste Integral" (indicado na figura 6.6) é detalhada no fluxograma da figura 6.10.

Conforme dito acima, a usina sob teste deve ser dotada de um recurso de autorrestabelecimento. Numa perturbação real, o recurso de autorrestabelecimento entra em operação ao ser verificada ausência de tensão de todas as fontes de energia para o serviço auxiliar. Se este recurso for um GMG, haverá uma alimentação confiável para magnetização do seu campo inicial (banco de baterias ou outra fonte que provém do próprio serviço auxiliar CA). É coerente, e exigido pela rotina de testes, que, durante a sua realização, a fonte CA para excitação inicial do campo do GMG esteja desligada, pois, numa perturbação, esta fonte não estará presente. Desta forma, o processo para execução do teste integral tem início com o desligamento desta fonte CA para o campo, contando apenas com as baterias para excitação inicial do mesmo. Esta fase corresponde ao passo "Desligar fonte segura de suprimento do recurso de autorrestabelecimento"

As unidades geradoras que participarão do teste integral devem ser ligadas a uma barra desergizada, fazendo-se, portanto, necessária a desenergização de uma barra para tal. Esta fase corresponde ao passo "Desenergizar uma barra para ligação das UGs"

As UGs devem inicialmente estar interligadas ao SIN, antes do início do teste. Esta fase corresponde aos passos "Condição inicial" e "Interligar ao SIN as UGs que passarão pelo teste".

O teste deve ser executado individualmente em cada uma das unidades geradoras. Sendo assim, há o *loop* no fluxograma da figura 6.10, para garantir a realização do teste em todas elas. Seu início é caracterizado pelo passo "Iniciar teste integral individual". A UG sob teste é indicada como UG *n*.

A unidade geradora que passará pelo teste integral individual tem sua geração reduzida, para que sejam evitados golpes de geração no SIN, e, portanto, recebem comando de parada e têm seu disjuntor de interligação aberto. O marco para iniciar a contagem do tempo de normalização da UG é a

abertura do disjuntor. O processo de parada da unidade geradora é mostrado no Capítulo 3 na tabela 3.4. Esta fase corresponde aos passos "Reduzir geração da UG *n*", "Parar UG *n*", "Condição do Disjuntor" e "Aguardar abertura do disjuntor de interligação".

É condição para o teste individual que a UG conclua o processo de parada até a "aplicação" do sistema de frenagem. O tempo de frenagem das unidades geradoras tem sido crítico, fato que pode comprometer o período de realização do teste. Quanto mais alta a velocidade síncrona de uma UG, maior será seu tempo de frenagem. Além disso, as folgas nas palhetas do distribuidor, em função da continuidade de passagem da água, podem provocar maior dificuldade de frenagem. Concluído o processo de parada, os auxiliares elétricos, tais como bombas de refrigeração e exaustores, são desligados. Esta fase corresponde aos passos "Iniciar contagem de tempo necessário para ligação da UG *n*", "Condição de Frenagem" e "Aguardar aplicação do sistema de frenagem".

No próximo passo, a UG é restabelecida e ligada à barra desenergizada utilizando exclusivamente o recurso de autorrestabelecimento, concluindo, desta forma, o teste integral individual. Todas as pré-condições de partida bem como o processo de ligação da UG estão apresentados no Capítulo 3 através das tabelas 3.2 e 3.3 respectivamente. Esta fase corresponde aos passos "Interligar UG *n* à barra desenergizada" e "Fim do teste integral individual da UG *n*".

Todo o processo descrito acima deve ser repetido para as demais UGs. Esta fase corresponde aos passos "Condição de Finalização" e "Selecionar a próxima UG *n*". Após a última unidade, o teste integral individual é finalizado e poderá ser iniciado o teste simultâneo, o qual é esquematizado no fluxograma da figura 6.11.

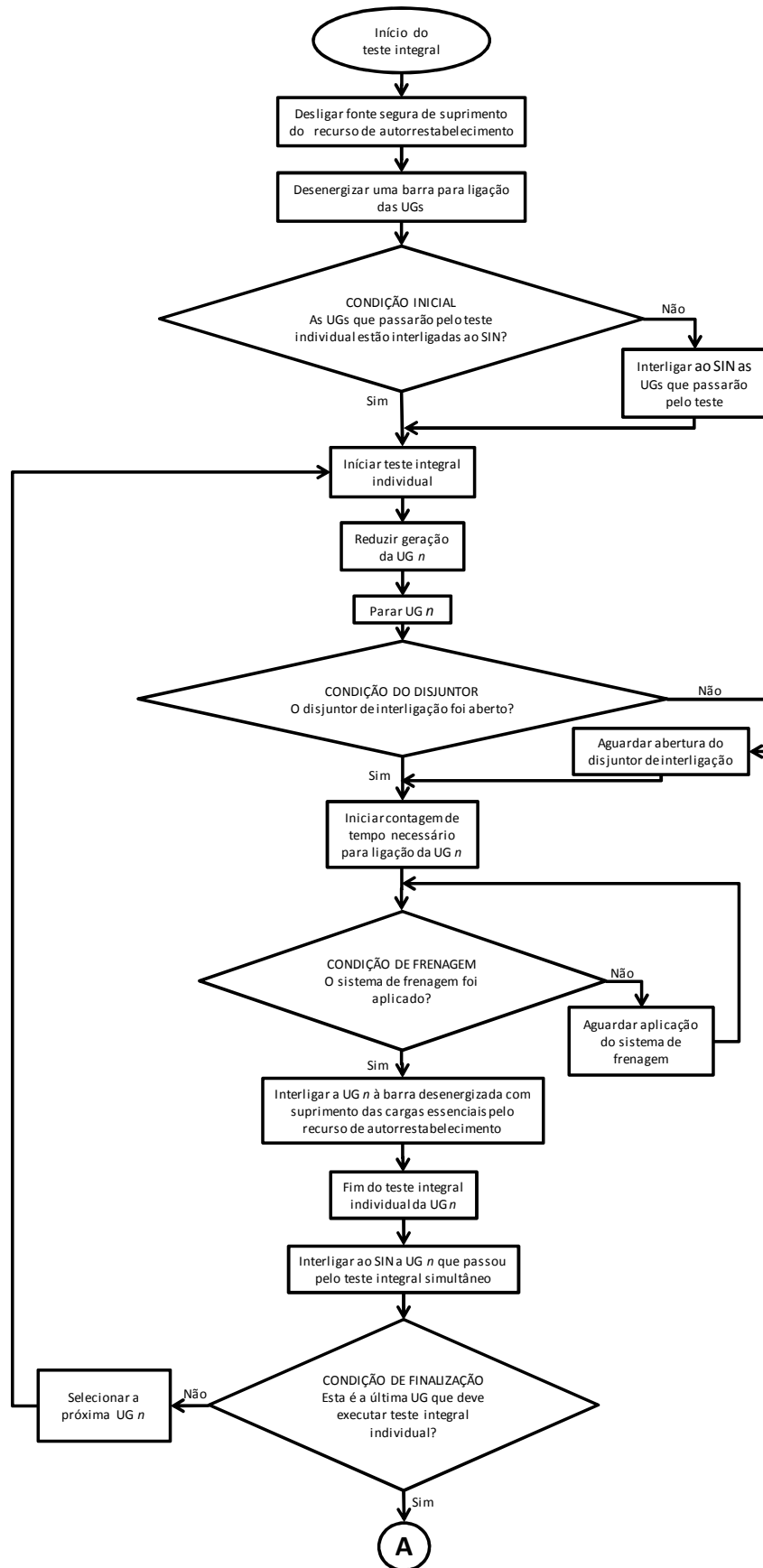



Figura 6.10 - Teste integral individual estratificado.

O teste integral simultâneo ocorre de forma similar ao individual, diferenciando-se especialmente pela quantidade mínima de unidades geradoras que passam simultaneamente pelo teste. Adicionalmente, estas UGs não necessitam aguardar a aplicação do sistema de frenagem para que o seu restabelecimento ocorra.

Outra diferença com relação ao teste anterior é que o GMG deverá partir pela segunda vez (sendo que a primeira ocorreu durante o teste individual). Tal procedimento verifica a capacidade do banco de baterias para suportar a excitação inicial do GMG.

Outra diferença é que as UGs devem ser ligadas simultaneamente à barra desenergizada e permanecerem desta forma por período determinado pela rotina, o qual é atualmente de 60 segundos. Esta fase corresponde aos passos "Condição de tempo" e "Aguardar o tempo mínimo das UGs ligadas simultaneamente à barra desenergizada ser atingido".

Após a conclusão do teste integral as unidades geradoras podem ser interligadas ao SIN e sua geração ser normalizada. Estas ações são verificadas através dos passos "Interligar as UGs ao SIN" e "Elevar a geração das UGs que passaram pelo teste simultâneo". Desta forma, a fonte segura para o recurso de autorrestabelecimento pode ser religada e a configuração da subestação normalizada.

Tanto para o individual quanto para o simultâneo, é interessante que sejam paradas todas as unidades geradoras, para proporcionar comutações automáticas no serviço auxiliar e verificar, inclusive, o seu pleno funcionamento. Consequentemente, deve ser mantida vazão mínima no rio, que também deve ser parametrizada inicialmente, e proporcionada através dos dispositivos extravasores (vertedouro).

Verifica-se, entretanto, que, em função de necessidades sistêmicas ou hidrológicas, pode ser necessário manter unidades geradoras em operação, durante a realização do teste, seja para a manutenção da vazão do rio ou para controle de tensão. Desta forma, faz-se necessário manter o suprimento também para a UG que for mantida em operação.

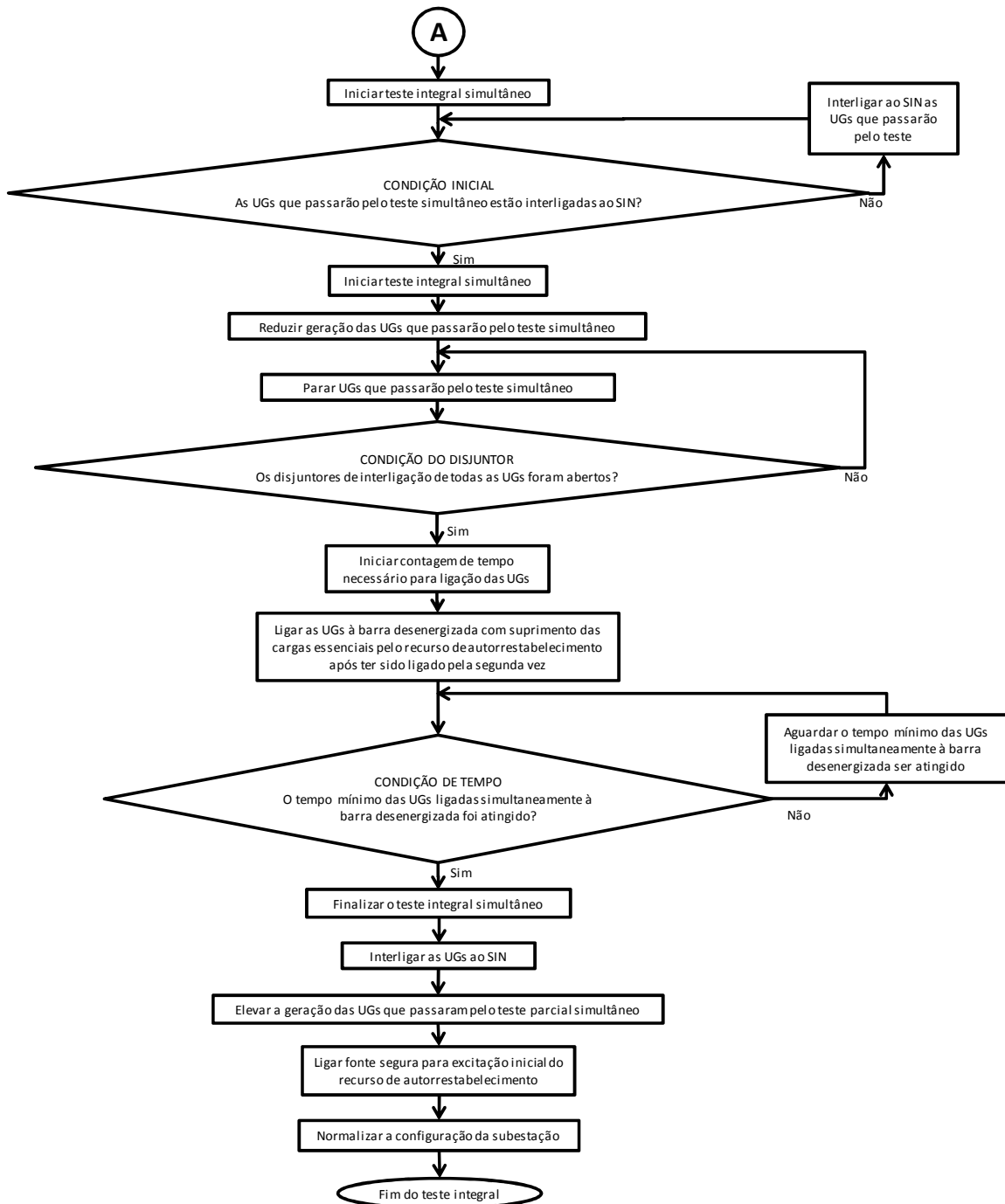



Figura 6.11 - Teste integral simultâneo estratificado.

6.4 Considerações Finais

Num país de dimensões continentais, envolvendo inúmeros agentes e diversas filosofias de projeto de unidades geradoras, é praticamente impossível determinar uma regra geral e inflexível para projetos que contemple a realização de testes de recomposição em usinas hidrelétricas. Cabe aos agentes verificar suas particularidades adaptando-se aos conceitos gerais e necessidades, para validação da plena disponibilidade das unidades geradoras durante uma perturbação, de forma a minimizar os transtornos advindos de alterações na rotina de recomposição e simulações destas condições de contorno para realização dos testes.

Observa-se que, como apresentado nas recomendações, a habilitação de uma usina para realizar teste não consiste apenas em possuir um recurso de autorrestabelecimento (como o GMG). É bem verdade que a capacidade de autorrestabelecimento está muito relacionada à presença ou não de um recurso para tal, mas a capacidade de simular as condições de perturbação passa por adequações mais profundas.

Vale observar que de nada adianta ser capaz de restabelecer (possuir recurso de autorrestabelecimento), se não for possível testar o conjunto para verificar sua disponibilidade durante uma perturbação real. Falhas no processo podem provocar falta de energia por tempo muito maior do que aquele necessário se o processo de restabelecimento ocorresse conforme planejado.

Em suma, mais do que ser classificada como usina de autorrestabelecimento, esta deve ser capaz de testar a plena funcionalidade de seus recursos de autorrestabelecimento e sistemas. Desta forma, é extremamente importante que estas simulações ocorram, para proporcionar validação da disponibilidade das usinas, bem como o suprimento de energia elétrica para a sociedade de forma contínua.

Conforme enfatizado ao longo deste trabalho, na opinião dos autores, é vital que tais condições sejam planejadas ainda na fase de projeto. Contudo, percebeu-se que esta mudança de perspectiva poderia introduzir expressiva complexidade aos processos previamente estabelecidos, surgindo assim a motivação para a proposta do SIAPE visando dirimir tal complexidade, inerente ao processo de realização dos testes.

7 CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

O tema abordado nesta dissertação - *Testes Reais de Recomposição de Usinas de Autorrestabelecimento* - Proposta Aplicada a Projetos de Usinas Hidrelétricas de Autorrestabelecimento constitui uma das questões mais atuais no contexto de segurança para o suprimento do sistema elétrico de potência.

A rotina operacional para realização dos testes de recomposição, elaborada pelo ONS, para implementação e execução em usinas classificadas do SIN, exige dos agentes a elaboração de estratégias e procedimentos para sua execução. Tais estratégias e procedimentos nem sempre são triviais pela diversidade de projetos existentes que, na maioria dos casos, não contemplam tal necessidade que é relativamente recente.

A necessidade de fornecer um *feedback* às áreas de projeto de usinas hidrelétricas, quanto à realização de testes reais de recomposição, constituiu a principal motivação deste trabalho.

A princípio, a proposta da dissertação era fornecer algumas diretrizes à área de projetos de usinas hidrelétricas. Entretanto, ao longo do trabalho foi verificada, a partir de usinas adequadas à execução do teste, a oportunidade de propor um procedimento a ser automatizado, para realização dos mesmos: o SIAPE. Este integraria o conjunto de outros automatismos já implementados em usinas hidrelétricas, tais como: parada, partida, conversão e reversão de unidades geradoras, circuito de alívio de carga, exercício do GMG e tantos outros.

Sendo assim, em um contexto de constante automação de processos consagrados, esta dissertação sinaliza diretrizes interessantes quanto ao projeto de sistemas automatizados de usinas hidrelétricas proporcionando benefícios para todo o setor.

Os ganhos podem ser mensurados por meio de diversos parâmetros, tais como o aumento da confiabilidade na execução do teste, otimização de tempo de manobras e de pessoal, a redução de erros de manobras, minimização de estudos para montagem de estratégias para execução, automatização do processo, dentre outros.

Como proposta de continuidade para este trabalho, as seguintes questões ainda poderiam ser investigadas:

- Avaliação da eficácia dos parâmetros que têm sido verificados na rotina RO-RR.BR.01 analisando aqueles que possivelmente devem ser alterados de forma a eficientizar os testes de recomposição;
- Verificação da possibilidade de alterar o processo de recomposição de forma a utilizar recursos de autorrestabelecimento em usinas de autorrestabelecimento parcial considerando que estas não necessariamente permanecerão rodando a vazio numa perturbação real;
- Análise das perturbações reais ocorridas a partir da vigência da RO-RR.BR.01 verificando o comportamento das usinas em detrimento de terem seu testes aprovados ou não;
- Verificação de equipamentos relevantes para recomposição das usinas de autorrestabelecimento propondo critérios e periodicidade para realização de testes específicos nestes equipamentos, inclusive com a possibilidade de pontuação quanto ao impacto destes durante a recomposição;
- Implementação de melhorias no SIAPE de acordo com as alterações que ocorrerem na rotina para testes reais de recomposição;
- Implementação de forma prática do SIAPE em usinas e nos centros de operação;
- Avaliação do impacto econômico da implementação das diretrizes propostas neste trabalho.

Espera-se que esta dissertação contribua para a área de projetos de usinas hidrelétricas, bem como para área de operação dos sistemas elétricos, em especial quanto à realização dos testes reais de recomposição. Esta visão integradora de áreas configura o caráter inovador da pesquisa, trazendo a perspectiva de ganhos para todo o setor elétrico, incluindo agentes e consumidores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[ANEEL, 1998] Resolução ANEEL N.º 395, de 4 de dezembro de 1998 - Estabelece os procedimentos gerais para registro e aprovação de estudos de viabilidade, projeto básico de empreendimentos de geração hidrelétrica, assim como da autorização para exploração de centrais hidrelétricas até 30 MW e dá outras providências.

[ANEEL, 2005] Anexo I da Resolução ANEEL nº 343, de 9 de dezembro de 2008 - Condições Gerais do Projeto Básico (jan/2009).

[ANEEL, 2009] Condições Gerais do Projeto Básico (Jan/2009).

[ANEEL, 2010] Anexo III da Resolução Nº 421/10 - Itens de Verificação para Aceite de Projeto Básico de UHE.

[ANEEL, 2013] http://www.aneel.gov.br/

[ANEEL, 2013a] ANEEL - Formulário de Check-list de aceite de Usinas Hidrelétricas.

[CEMIG, 2006] Instruções de Operação de Usinas Hidrelétricas da CEMIG.

[CEPEL, 2007] Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas / Ministério de Minas e Energia, CEPEL. – Rio de Janeiro, 2007.

[CMSE, 2013] http://www.mme.gov.br/mme/menu/conselhos_comite/cmse.html

[CNPE, 2013] http://www.mme.gov.br/mme/menu/conselhos_comite/cnpe.html

[CUNHA, 2006] CUNHA, G. S., “Usinas Diesel em Usinas Hidrelétricas”, Dissertação de Mestrado, Orientador: Burani, G. F., Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

[ELETROBRAS, 1999] ELETROBRAS - Diretrizes para Elaboração de Projeto Básico de Usinas Hidrelétricas

[EPE, 2013] http://www.epe.gov.br/Paginas/default.aspx

[LOPES, 2002] LOPES, G. M., “Proposta de Estratégia para Agilização do Controle Restaurativo de Sistemas Elétricos de Potência”, Dissertação do Curso de Especialização em Sistema Elétrico de Potência, Orientadora: Vale, M., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

[MME, 2013] http://www.mme.gov.br/mme

[ONS, 2009] RELATÓRIO DE ANÁLISE DE PERTURBAÇÃO, ONS-RE-3-252/2009, ONS, Dezembro, 2009.

[ONS, 2009a] PROCEDIMENTOS DE REDE DO ONS, Módulo 14 - Administração de Serviços Ancilares, 2009.

[ONS, 2010] PROCEDIMENTOS DE REDE DO ONS, submódulo 3.6 - Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão às Instalações de Transmissão

[ONS, 2012] PROCEDIMENTOS DE REDE, Submódulo 20.1: “Glossário de termos técnicos”, ONS, revisão 1.0.

[ONS, 2012a] PROCEDIMENTOS DE REDE, Submódulo 10.1: “Manual de Procedimentos da Operação”, ONS, revisão 1.1.

[ONS, 2014] RO-RR.BR.01, “Testes Reais de Recomposição nas Usinas de Autorrestabelecimento”, ONS, revisão 19.

[ROCHA, 2010] ROCHA, G. C., Estudo sobre Serviços Auxiliares Elétricos de Usinas Hidrelétricas", Monografia do Curso de Especialização em Sistema Elétrico de Potência, Orientadora: Vale, M., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

[SOUZA, 2012] SOUZA, J.A., PINTO, A.P., “Soluções Encontradas pela CEMIG para realização dos Testes Reais de Recomposição de Conforme RO-RR.BR”, SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Rio de Janeiro, Brasil, 20 a 23 de Maio, 2012.

[SOUZA, 2012a] SOUZA, J.A., “Melhorias Implantadas nas Usinas da CEMIG a partir de Observações dos Testes Reais de Recomposição conforme RO-RR.BR.01”, SENOP – Seminário Nacional de Operadores de Sistemas e de Instalações Elétricas, São Paulo, Brasil, 11 a 14 de Junho, 2012.

[SOUZA, 2012b] SOUZA, J.A., “Testes Reais de Recomposição em Usinas Hidrelétricas”, Monografia do Curso de Especialização em Sistema Elétrico de Potência, Orientadora: Vale, M., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

[SOUZA, 2013] SOUZA, J.A., VALE, M. H. M., “Análise da Metodologia para Execução dos Testes Reais de Recomposição de Usinas de Autorrestabelecimento conforme RO-RR.BR”, XXII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília - DF, Brasil, 13 a 16 de Outubro, 2013.

[VERBOONEN, 2012] VERBOONEN, I., Martins, A. M., Nogueira, F. L. A., Schwarc, T. F., "Gestão dos Testes de Black-Start Realizados no SIN", EDAO – Encontro para Debate para Assuntos de Operação, Brasília, Brasil, 26 a 29 de Novembro, 2012.

APÊNDICE A - CRITÉRIOS PARA PROJETOS ELETROMECÂNICOS

Quanto ao projeto dos equipamentos eletromecânicos o documento [ELETROBRAS, 1999] indica o critério mais relevante que deverão ser utilizados no projeto:

- *Utilizar preferencialmente equipamentos, materiais e acessórios disponíveis no mercado nacional, possibilitando a sua reposição em curto prazo;*
- *Não especificar parâmetros que não sejam requeridos pelo Sistema de Potência ou por qualquer outra necessidade (especialmente para o gerador e transformador elevador);*
- *Os serviços auxiliares elétricos devem ter duas fontes normais e independentes de alimentação e uma de emergência para os serviços e sistemas vitais da usina;*
- *Considerar como vitais, no mínimo, o sistema de drenagem da Casa de Força, os carregadores de baterias, as comportas do vertedouro e iluminação de emergência;*
- *O sistema de aterramento deve ser dimensionado e projetado em função da maior corrente de curto-circuito e de tempo de eliminação da falha. Deve considerar as tensões permissíveis de passo e de toque;*
- *Privilegiar a utilização de disjuntores de baixa tensão em vez de fusíveis;*
- *Definir tensões nominais normalizadas, em número mínimo compatível com necessidades;*
- *Analisar a necessidade de uma fonte de energia externa (ou de emergência) para partida de uma unidade em caso de falta geral dos serviços auxiliares elétricos da usina;*
- *A definição do Sistema de Controle (comando, proteção, supervisão e regulação) deverá descrever a filosofia de partida e de paradas normal e de emergência das unidades geradoras e da operação da usina e da subestação a serem adotadas, incluindo os diversos automatismos, níveis e locais (local / central / remoto) de operação;*
- *Os requisitos do sistema de proteção deverão definir os elementos mínimos necessários à proteção da unidade geradora, do sistema de excitação, do regulador de velocidade, do transformador elevador, da subestação, das saídas de linhas de transmissão e dos equipamentos dos sistemas de serviços auxiliares da usina;*
- *Os requisitos do sistema elétrico referentes à operação das unidades geradoras deverão ser estabelecidos previamente, em particular aqueles relativos à operação dessas unidades em regime de base ou ponta e se serão utilizadas como compensadores síncronos;*
- *Deverão ser definidas margens de segurança adequadas com relação às velocidades críticas do conjunto rotativo da unidade geradora para eliminar a ocorrência de ressonância paramétrica.*

  Fonte: [ELETROBRAS, 1999]

O documento [ELETROBRAS, 1999] estabelece parâmetros que devem ser determinados para as seguintes estruturas:

Casa de Força

- *Definição da estrutura dos blocos;*
- *Definição dos concretos de primeiro e segundo estágio dos blocos;*
- *Definição das escavações, do tratamento e do sistema de drenagem das fundações;*
- *Definição da superestrutura;*
- *Análise de estabilidade dos blocos;*
- *Cálculos estruturais dos blocos e da superestrutura, em nível de pré-dimensionamento;*
- *Definição do plano de concretagem;*
- *Estimativa de volumes de concreto e demais materiais.*
- *Durante o comissionamento da primeira unidade todos os equipamentos essenciais a sua segura operação deverão estar instalados e prontos para operação;*
- *As distâncias das cargas aos centros de distribuição serão os menores possíveis;*
- *Os equipamentos serão dispostos de maneira a facilitar os trabalhos de manutenção e principalmente de operação.*

  Fonte: [ELETROBRAS, 1999]

Turbinas

- *Tipo;*
- *Numero de unidades;*
- *Potência nominal;*
- *Vazão nominal;*
- *Rotação nominal;*
- *Rendimentos esperados;*
- *Níveis de montante: máximo de enchente, máximo normal, mínimo, mínimo excepcional;*
- *Níveis de jusante: máximo de enchente, máximo (todas as unidades com carga nominal), mínimo (uma unidade com carga nominal), mínimo (sem fluxo);*
- *Quedas líquidas: máxima operacional nominal, mínima operacional de projeto de referência;*
- *Número específico de rotação;*
- *Rotação de disparo estimada;*
- *Diâmetro de entrada do rotor;*
- *Diâmetro de saída do rotor;*
- *Elevação da linha de centro do distribuidor;*
- *Altura de sucção;*
- *Dimensões principais da caixa espiral;*
- *Altura do tubo de sucção;*
- *Largura e altura da saída do tubo de sucção;*
- *Distância do centro da unidade até a seção de saída do tubo de sucção;*
- *Diâmetro do poço da turbina;*
- *Sobrepressão;*
- *Sobrevelocidade máxima admissível em rejeição de carga máxima;*
- *Tipo de regulador de velocidade;*
- *GD2 da turbina;*

- *Arranjo dos mancais;*
- *Pesos estimados do rotor, eixo, pré-distribuidor e caixa espiral;*
- *Peso estimado da turbina completa.*

Fonte: [ELETROBRAS, 1999]

Geradores

- *Potência nominal;*
- *Número de unidades;*
- *Tensão de geração;*
- *Faixa de variação de tensão para potência máxima contínua;*
- *Fator de potência;*
- *Frequência;*
- *Rotação nominal;*
- *Sentido de rotação;*
- *Rendimento estimado à potência e tensão nominais;*
- *Temperaturas máximas para regime contínuo à potência nominal (estator e rotor);*
- *Classe de isolamento dos materiais (estator e rotor);*
- *Efeito de inércia;*
- *Reatância síncrona do eixo direto;*
- *Reatância transitória de eixo direto;*
- *Relação entre a reatância subtransitória de eixo em quadratura e a reatância subtransitória do eixo direto;*
- *Constante de tempo transitória do eixo direto em circuito aberto;*
- *Diâmetro externo do estator (sem trocadores de calor);*
- *Diâmetro interno do alojamento do gerador;*
- *Diâmetro externo do rotor;*
- *Altura do núcleo do estator;*
- *Altura do alojamento do gerador;*
- *Peso estimado do rotor;*
- *Peso estimado do estator;*
- *Peso estimado do gerador completo.*

Fonte: [ELETROBRAS, 1999]

Barramentos Blindados e Cubículos Associados

- *Arranjo físico, indicando derivações, estruturas de suporte, acessos para montagem e manutenção;*
- *Dimensionamento eletrodinâmico;*
- *Estudo de coordenação de isolamento entre geradores, barramentos blindados, transformadores elevadores, subestação blindada (se aplicável) e linha de transmissão aérea de saída da casa de força;*
- *Características das ligações aos terminais do gerador, do transformador elevador, do transformador de excitação e do transformador ou reator limitador de corrente para os serviços auxiliares e cubículos de surtos;*
- *Características dos invólucros quanto ao aterramento, vedação contra poeira, unidade, insetos, e quanto à drenagem da umidade acumulada devido à condensação;*
- *Avaliação das perdas no barramento e invólucro;*
- *Características dos transformadores para instrumento, capacitores e para-raios do cubículo de surto.*

Fonte: [ELETROBRAS, 1999]

Sistemas Auxiliares Elétricos de CA e CC

- *Deverão ser definidos de modo mais amplo os aspectos relativos aos serviços auxiliares da casa de máquinas. Tratando-se de sistemas integrados, essas definições deverão abranger as demais estruturas da usina: vertedouro, tomada d'água e subestação.*
- *Definição da configuração básica do sistema de distribuição de média tensão, incluindo filosofias de operação, proteção e controle, além da tabela preliminar de carga;*
- *Definição da configuração básica do sistema de distribuição de baixa tensão, incluindo filosofias de operação, proteção e controle, além da tabela preliminar de carga;*
- *Definição da configuração básica do sistema de distribuição de corrente contínua, incluindo filosofias de operação, proteção e controle, além da curva de carga;*
- *Definição do sistema de geração de emergência, incluindo filosofias de operação e controle, além da tabela preliminar de carga;*
- *Memórias de pré-dimensionamento dos equipamentos principais dos serviços auxiliares;*
- *Estudo de curto-circuito;*
- *Descrição básica dos equipamentos principais dos serviços auxiliares, como transformadores, equipamentos de manobra, quadros de distribuição, carregadores de baterias, baterias e outros.*

Fonte: [ELETROBRAS, 1999]

Sistemas Auxiliares Mecânicos

O projeto dos sistemas auxiliares será desenvolvido com base nas experiências de empreendimentos similares e nas normas técnicas aplicáveis. O pré-dimensionamento desses sistemas será executado em função das características básicas dos equipamentos principais da usina que serão atendidos pelos mesmos.

- *Sistema de água de serviço de uso geral;*
- *Sistema de água de resfriamento das unidades geradoras e do selo de vedação das turbinas;*
- *Sistemas de proteção contra incêndio para os geradores, a sala de tratamento de óleo, os transformadores elevadores e outros equipamentos;*
- *Sistemas de tratamento de óleo lubrificante e óleo isolante;*
- *Sistema de ar comprimido para uso geral e para os freios dos geradores;*
- *Sistema de ar comprimido para operação das unidades geradoras em cargas parciais;*
- *Sistema de ar comprimido para rebaixamento do nível no tubo de sucção em operação como síncrono;*
- *Sistema de ar comprimido de alta pressão para os reguladores de velocidade das turbinas;*
- *Sistema de enchimento e esgotamento das unidades;*
- *Grupo gerador de emergência e equipamentos associados;*
- *Sistemas de medição de nível do reservatório e do canal de fuga;*
- *Sistema de drenagem;*
- *Sistemas de ventilação e ar condicionado;*
- *Sistema geral de proteção contra incêndio;*

Fonte: [ELETROBRAS, 1999]

Sistemas de Supervisão, Controle e Proteção

Deverão ser definidas as filosofias de proteção, controle e supervisão das unidades geradoras, abrangendo:

- *Definição da arquitetura dos sistemas de supervisão e controle incluindo os diversos níveis hierárquicos de operação e controle de equipamentos;*
- *Definição dos relés de proteção do gerador, transformador elevador e vão de interligação a partir de estudos das características de geração e contingências operacionais.*

  Fonte: [ELETROBRAS, 1999]

Sistemas de Utilidades

Deverá ser analisada a necessidade de sistemas de utilidades para complementar os auxiliares da usina, tais como:

- *Tratamento e distribuição de água potável;*
- *Coleta e tratamento de esgoto.*

  Fonte: [ELETROBRAS, 1999]

Condutos para Cabos (eletrodutos, prateleiras e canaletas)

A escolha do tipo de conduto a ser empregado em cada área deverá considerar os seguintes aspectos:

- *Adequação do conduto ao ambiente;*
- *Proteção de fiação;*
- *Facilidade de instalação da fiação;*
- *Ocupação ordenada dos condutos.*

  Fonte: [ELETROBRAS, 1999]

Sistemas de Comunicação

Os sistemas de comunicação da usina serão definidos nesta fase do projeto. Deverão ser previstos neste estudo os sistemas de comunicação necessários à construção e operação da usina, subestação e vila residencial e sua interligação ao sistema de comunicação das empresas interligadas. Esses sistemas poderão compreender:

- *Sistema telefônico;*
- *Sistema de busca-pessoa em alta voz;*
- *Sistema de energia para equipamentos de telecomunicações;*
- *Sistema rádio de alerta capacidade;*
- *Sistema óptico;*
- *Sistema de sismologia;*
- *Rede de hidrometeorologia;*
- *Sistema de supervisão de telecomunicações;*
- *Sistema de rádio chamada;*
- *Rede local de microcomputadores;*
- *Circuito interno de TV;*
- *Interligação com a rede de telefonia pública;*
- *Rede móvel de apoio à construção.*

  Fonte: [ELETROBRAS, 1999]

Subestação da Usina

A subestação da usina compreende os transformadores elevadores e a subestação secionadora. A localização e cota de implantação da subestação deverão ser estudadas em conjunto com a definição do arranjo geral do empreendimento. A partir do diagrama unifilar deverá ser elaborado o arranjo físico da subestação (planta e cortes) bem como os resultados conclusivos dos estudos de dimensionamento de barramentos, cálculos de flechas e tensões, esforços nos terminais dos equipamentos e níveis de curto-circuito. O projeto dos barramentos deverá incluir investigações sobre:

- *Intensidade de corrente nos barramentos em regime de operação normal e sob condições de curto-circuito;*
- *Corona e rádio interferência;*
- *Considerações sobre barramentos rígidos e flexíveis;*
- *Esforços nas estruturas;*
- *Características elétricas e mecânicas das colunas e cadeias de isoladores;*
- *Proteção contra descargas atmosféricas.*

Para a implantação da subestação deverá ser selecionada a área mais conveniente, tanto sob o ponto de vista elétrico propriamente dito, como também sob os aspectos de segurança, facilidade de acesso e entradas para as linhas de transmissão.

Deverão ser desenvolvidos estudos para definição dos níveis de isolamento e características elétricas de equipamentos.

Os estudos de coordenação de isolamento consistirão de verificações a partir dos níveis de isolamento dos equipamentos. Essas verificações serão concentradas no número e localização dos para-raios, considerando-se o arranjo físico concebido para a subestação.

Deverão ser feitos também estudos sobre as características de tensões de restabelecimento dos disjuntores e chaveamentos de transformador, reator e linhas.

Deverão ser desenvolvidos estudos comparativos entre subestações convencionais de elevação e seccionamento, com as subestações compactas em SF6 abrigadas na Casa de Força.

Fonte: [ELETROBRAS, 1999]

Interligação da Casa de Força à Subestação Secionadora

Deverão ser estudadas as linhas de transmissão de interligação dos transformadores elevadores da usina à subestação, definindo no mínimo:

- *Tensão de transmissão;*
- *Número de circuitos;*
- *Tipo e quantidade de cabos condutores e para-raios;*
- *Tipo e quantidade de estruturas;*
- *Número de cabos condutores por fase;*
- *Comprimento.*

Deverá ser estudada a interligação entre a sala de controle da usina e a subestação secionadora para os cabos de controle, proteção, supervisão, comunicação e serviços auxiliares.

Fonte: [ELETROBRAS, 1999]